



**Pedro Miguel Oliveira**

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

## **Análise da influência dos parâmetros de injeção de polímeros no acabamento superficial**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Mecânica

Orientador: Professor Doutor Jorge Joaquim Pamies Teixeira,  
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Doutor João Mário Burguete Botelho Cardoso,  
Professor Associado da Faculdade de Ciências e  
Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Arguentes: Doutor Telmo Jorge Gomes dos Santos,  
Professor Auxiliar da Faculdade de Ciências e  
Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Vogal: Professor Doutor Jorge Joaquim Pamies Teixeira,  
Faculdade de Ciências e Tecnologia da  
Universidade Nova de Lisboa



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Setembro, 2018**

***Análise da influência dos parâmetros de injeção de polímeros no acabamento superficial***

Copyright © 2018 Pedro Miguel Oliveira, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

*Aos meus pais...*

## Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço ao meu orientador, Professor Jorge Joaquim Pamies Teixeira, pelo apoio, disponibilidade e colaboração dada no desenvolvimento da dissertação.

Um agradecimento especial ao Engº Miguel Teixeira e à CADFLOW pela disponibilização do software Moldflow e por todo o apoio ao nível da utilização do software assim como da formação dada ao longo da dissertação.

Ao Engº João Serpa e à JAC Products, por toda a ajuda, disponibilidade e partilha de conhecimento.

Aos meus colegas da JAC Products pelo apoio, interesse e ajuda com as variadas questões colocadas ao longo do desenvolvimento da dissertação.

Agradeço à Caetano Coatings e aos seus colaboradores pela partilha de conhecimento e ajuda na questão da pintura dos polímeros.

Ao meu grande amigo Pedro Barbas por todas as longas horas passadas na escrita desta dissertação e todo o apoio fora dela.

Aos meus amigos que fizeram este longo caminho de 5 anos ao meu lado.

E por fim, aos meus pais e namorada que sempre me apoiaram e ajudaram em tudo.

## Resumo

---

A indústria automotiva é extremamente competitiva e com índices de qualidade muito elevados. Isto exige uma constante necessidade de aperfeiçoamento e desenvolvimento por forma a os processos sejam otimizados e a qualidade dos produtos cada vez maior. Desta forma, na indústria de injeção é cada vez mais procurado o rigor, precisão, tolerâncias e menores tempos de fabrico.

Esta dissertação tem por base o projeto de umas peças de um veículo automóvel em ABS que são peças de classe A, peças ao nível do olhar do cliente, onde o principal requisito é estético. Durante este processo, irá ser usado o software Moldflow para simular e comparar com os resultados obtidos diretamente do molde, assim como uma máquina de medição de brilho para a medição de rechupes.

Foram testadas várias peças já produzidas, comparadas com os resultados de simulação e posteriormente foi evidenciado um possível mecanismo para a compreensão do comportamento superficial dos polímeros. Após a evidência desse mecanismo, foi necessário recorrer a uma validação dos resultados executando exatamente os mesmo estudos e comparações de resultados para outra peça semelhante.

**Palavras-chave:** Injeção de polímeros, MoldFlow, Tensões superficiais, Energia de superfície, Rechupes.

---

# Abstract

---

The automotive industry is extremely competitive and has very high quality indices. This requires a constant need for improvement and development so that processes are optimized and product quality is increasing. In this way, in the injection industry is increasingly sought the rigor, precision, tolerances and shorter manufacturing times.

This dissertation is based on the design of parts of an ABS vehicle where they are Class A pieces, parts at the customer's eye level, where the main requirement is aesthetic. During this process, Moldflow software will be used to simulate and compare with the results obtained directly from the mold, as well as a brightness measuring machine for the measurement of sink marks.

Several pieces already produced were tested, compared to simulation results and later a possible mechanism for the understanding of the superficial behavior of the polymers was evidenced. After evidence of this mechanism, it was necessary to resort to a validation of the results by executing exactly the same studies and comparisons of results for another similar piece.

**Keywords:** Injection of Polymers, MoldFlow, Surface tensions, Surface energy, Sink marks.

---

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Contextualização do problema na JAC Products	2
1.2	Motivação do trabalho	2
1.3	Importância do tema	2
1.4	Objetivos	3
1.5	Estrutura do trabalho	3
<b>2</b>	<b>Estado de Arte</b>	<b>5</b>
2.1	Polímeros	5
2.1.1	Amorfos	5
2.1.2	Semi-Cristalinos	5
2.1.3	Líquido-Cristalino	6
2.1.4	Termoduros	6
2.2	Comportamento mecânico dos polímeros	7
2.3	Máquina de Injeção	8
2.3.1	Unidade de Injeção	8
2.3.2	Unidade de Fecho	9
2.3.3	Molde	10
2.4	Etapas da Injeção de Plástico	12
2.5	Revestimento das peças plásticas	14
2.5.1	Adesão	14
2.5.2	Coesão	15
2.5.3	Energia Superficial	15
2.5.4	Tratamentos para aumento da energia superficial	16
2.5.5	Medição da energia livre de superfície	17
2.6	Rechupes	25
2.6.1	Fatores de aparecimento de rechupes	25
2.6.2	Medição de rechupes	27
<b>3</b>	<b>Metodologia</b>	<b>29</b>
3.1	Software	29
3.1.1	Malha	30
3.2	Instrumentação	33
3.2.1	Calibração do medidor de brilho	33
3.3	Análise	35
3.3.1	Solução atual	36
3.3.2	Análise preliminar	37
3.3.3	Resultados para a solução atual	41
3.3.4	Solução Cashew	47
3.3.5	Análise preliminar	48
3.3.6	Resultados da solução "Cashew"	52
3.4	Análise superficial	56
3.4.1	Instrumentação	56
3.4.2	Resultados	62
3.4.3	Conclusões	65

<b>4</b>	<b><i>Validação de resultados</i></b>	<b>75</b>
4.1.1	Análise do enchimento	75
4.1.2	Posições de estudo	76
<b>4.2</b>	<b>Rechupes</b>	<b>78</b>
4.2.1	Rechupes das peças frontais	78
<b>5</b>	<b><i>Conclusões e Trabalhos futuros</i></b>	<b>81</b>
<b>5.1</b>	<b>Conclusão</b>	<b>81</b>
<b>5.2</b>	<b>Trabalho futuro</b>	<b>81</b>
	<b><i>Bibliografia</i></b>	<b>83</b>



## Lista de Figuras e Tabelas

Figura 1 - Tipos de termoplásticos,[3] .....	7
Figura 2 – Máquina de Injeção,[4] .....	8
Figura 3 - Unidade de Injeção,[4] .....	9
Figura 4 - Unidade de fecho,[4] .....	9
Figura 5 - Molde com vista explodida,[4] .....	10
Figura 6 - Molde de 2 placas,[5] .....	11
Figura 7 - Molde de 3 placas,[6] .....	11
Figura 8 - Molde de canais quentes,[7] .....	12
Figura 9 - Exemplo de molhabilidade,[12] .....	16
Figura 10 - Energia de superfície e molhabilidade,[13] .....	16
Figura 11 - Ângulo de contacto,[12] .....	17
Figura 12 - Canetas de medição comparativa da energia superficial, da marca Arcotest .....	18
Figura 13 - Esquema da equação de Young,[15] .....	19
Figura 14 - Exemplo de molhagem com diferentes ângulos de contacto,[15] .....	20
Figura 15 - Ilustração das ligação tendo em conta a polaridade das superfícies, adaptado de[18] .....	21
Figura 16 - Tensão superficial vs Ângulo de contacto por Zisman,[20] .....	22
Figura 17 - Método da capilaridade ascendente de Wilhelmy,[11] .....	24
Figura 18 - Efeitos principais do aparecimento de rechupes,[23] .....	26
Figura 19 - Influência da pressão de compactação na profundidade dos rechupes,[24] .....	27
Figura 20 - Medição de rechupes,[24] .....	28
Figura 21 - Tipos de malha presentes no software Moldflow .....	29
Figura 22 - Exemplo dos constituintes de uma malha,[25] .....	30
Figura 23 – Proporção do comprimento pela altura do elemento .....	31
Figura 24 - Correção das proporções elevadas .....	31
Figura 25 - Alinhamentos dos elementos, Antes .....	32
Figura 26 - Alinhamento dos elementos, Depois .....	32
Figura 27 - Exemplo de uma malha não concordante (esquerda); malha concordante (direita) .....	32
Figura 28 - Lentes do medidor de brilho .....	33
Figura 29 - Definição do ângulo de 60° .....	34
Figura 30 - Calibrador da reflexão .....	34
Figura 31 - Confirmação da calibração .....	35
Figura 32 - Resultado da análise de localização do ataque .....	35
Figura 33 - Solução atual em produção .....	36
Figura 34 - Gate 1 da solução atual .....	36
Figura 35 - Gate 2 da solução atual .....	37
Figura 36 - Janela de qualidade da solução atual .....	37
Figura 37 - Zona de manuseamento da solução atual .....	38
Figura 38 - Pressão de injeção vs Tempo de injeção para a solução atual .....	38
Figura 39 - Temperatura da frente chama para a solução atual .....	39
Figura 40 - Velocidade de distorção para a solução atual .....	40
Figura 41 - Tensão de corte para a solução atual .....	40
Figura 42 - Pressão de injeção para a solução atual .....	41
Figura 43 - Resultado da temperatura da frente quente do fundido para a solução atual .....	42
Figura 44 - Temperatura da frente chama na traseira da peça para a solução atual .....	43
Figura 45 - Pressão no final enchimento para a solução atual .....	44
Figura 46 - Velocidade de distorção para a solução atual .....	45
Figura 47 - Tensões residuais para a solução atual .....	46
Figura 48 - Solução "Cashew" proposta pela empresa .....	47
Figura 49 - Gate 1 da solução "Cashew" .....	47

Figura 50 - Gate 2 da solução "Cashew" .....	47
Figura 51 - Janela de qualidade da solução "Cashew" .....	48
Figura 52 - Zona de manuseamento da solução "Cashew" .....	49
Figura 53 - Pressão de injeção vs Tempo de injeção para a solução "Cashew" .....	49
Figura 54 - Temperatura da Frente quente do fundido vs Tempo de Injeção para a solução "Cashew" .....	50
Figura 55 - Velocidade de distorção para a solução "Cashew" .....	50
Figura 56 - Tensão de corte para a solução "Cashew" .....	51
Figura 57 - Pressão de injeção para a solução "Cashew" .....	52
Figura 58 - Temperatura da frente quente do fundido para a solução "Cashew" .....	53
Figura 59 - Pressão no final do enchimento para a solução "Cashew" .....	54
Figura 60 - Velocidade de distorção para a solução "Cashew" .....	55
Figura 61 - Tensão residual superficial para a solução "Cashew" .....	56
Figura 62 - Marcas presentes nas peças .....	57
Figura 63 - Secção, normal à direcção do escoamento para as condições, a) C1 e b) C2,[27]	58
Figura 64 - Rechupe na cor cinza .....	58
Figura 65 - Rechupe na cor laranja .....	59
Figura 66 - Esquema da influência das tensões de compressão na bolha .....	59
Figura 67 - Posição das áreas de análise .....	60
Figura 68 - Exemplo de medição da energia superficial.....	61
Figura 69 - Posições de medição do brilho .....	61
Figura 70 - Rechupe peça virgem .....	63
Figura 71 - Tensões médias nas posições em estudo .....	65
Figura 72 - Perfil da tensão residua para a posição 1 .....	66
Figura 73 - Perfil da tensão residua para a posição 2 .....	66
Figura 74 - Perfil da tensão residua para a posição 3 .....	67
Figura 75 - Perfil da tensão residua para a posição 4 .....	67
Figura 76 - Tensões residuais de superfície .....	68
Figura 77 - Perfil da contração volumétrica na posição 1 .....	69
Figura 78 - Perfil da contração volumétrica na posição 2 .....	69
Figura 79 - Perfil da contração volumétrica na posição 3 .....	70
Figura 80 - Perfil da contração volumétrica na posição 4 .....	70
Figura 81 - Contração volumétrica ao longo da espessura vs Contração superficial .....	71
Figura 82 - Energia superficial vs Tensão residual à superfície traseira .....	71
Figura 83 - Peças nas cores preto brilhante, branco e laranja, respectivamente .....	72
Figura 84 - Peça na cor cinza .....	72
Figura 85 - Peça virgem .....	73
Figura 86 - Tensões superficiais no rechupe,adaptado de[24].....	73
Figura 87 - Tempo de enchimento da cavidade do molde da solução atual .....	76
Figura 88 - Posições de estudo da segunda peça em estudo .....	76
Figura 89 - Energia superficial vs Tensão residual à superfície frontal .....	77
Figura 90 - Rechupe causado pelo reforço na peça frontal.....	79
Tabela 1 - Tabela de ângulos normalizada para medição de brilho,[26] .....	33
Tabela 2 - Condições de injeção,[27] .....	57
Tabela 3 - Medição da energia superficial .....	62
Tabela 4 - Tabela de medição do brilho, GU .....	63
Tabela 5 - Rechupe e causa.....	78

## 1 Introdução

Nos tempos correntes, a indústria produtora de componentes de materiais poliméricos tem uma grande solicitação por parte do mercado global. Este facto deve-se às variadas vantagens dos polímeros, pois é um material que apresenta um baixo custo de aquisição, é facilmente moldável com vista à obtenção das formas geométricas mais complexas e também reciclável. Devido à sua importância, seria de esperar a alta contribuição do sector para a sociedade e para a economia global. Utilizando o exemplo da Europa, a indústria do plástico é responsável por mais de 1.5 milhões de postos de trabalho diretos, atingindo 60 mil empresas e tendo um crescimento registado em 2015 de mais de 340 biliões de euros. A vertente automóvel representa mais de 8.9% do mercado atual da produção de componentes plásticas [1], tendo uma tendência crescente devido ao plástico apresentar uma baixa densidade reduzindo assim o peso do automóvel e aumentando a sua eficiência. Este sector é um dos mais competitivos atualmente, o que leva os fabricantes a um nível de detalhe muito elevado, com o intuito de superar os concorrentes. A este facto, acresce o problema do aspeto visual das peças produzidas, assim como as suas cores e revestimentos. A qualidade dos revestimentos, esta é muito influenciada pela qualidade de superfície das peças, em que a sua adesão está relacionada com a energia de superfície livre da peça, conferindo-lhe a propriedade de molhagem.

Assim, a injeção de plástico é um processo de produção muito utilizado nos dias de hoje, onde a manipulação do mesmo é uma mais valia para qualquer empresa que opere com estes equipamentos, com o intuito de se tornar mais competitiva no mercado, trazendo melhores acabamentos às peças produzidas e menores custos de produção. Com o desenvolvimento atual a moldação por injeção é capaz de produzir quaisquer geometrias complexas de peças com tolerâncias muito apertadas, porém é um processo que contém muitos parâmetros operacionais e vários efeitos físicos e químicos a ter em conta na produção das mesmas.

## 1.1 Contextualização do problema na JAC Products

Uma das empresas com grande influência na área de produção de barras de tejadilhos para a indústria automóvel em Portugal é a *JAC Products Portugal*, situada no Carregado, que neste momento é a sede europeia do grupo *JAC Products*.

A empresa produz barras de tejadilho, geralmente em ligas de alumínio, contudo, adquirindo peças em plástico para cobrir as barras e apresentar um melhor acabamento visual nos automóveis. Este tipo de peças requer um acabamento superficial de padrão muito elevado assim como tolerâncias reduzidas e resistência mecânica elevada, pois é um dos componentes que está ao nível do olhar do cliente classificado como classe A, a qual não é admitido qualquer marca de produção da peça. Assim, a *JAC Products Portugal* pretende desenvolver conhecimento sobre os fenómenos que influenciam a superfície das peças. Os tópicos a abordar serão:

- Marcas dos reforços criados nas peças
- A influência de raios de curvatura nas peças
- Previsão e atenuação de rechupes
- Tensões residuais
- Empenos
- Contração volumétrica
- Taxa de corte

## 1.2 Motivação do trabalho

A indústria automóvel é atualmente uma das mais competitivas no mercado. A busca por soluções mais económicas, robustas e eficientes é cada vez mais intensa. O automóvel é um produto que cada vez mais integra variados tipos de polímeros na sua constituição, seja como função estética ou funcional.

Com o aumento da procura de novos materiais pela parte da indústria automotiva, é preciso criar conhecimento sobre como manusear esses materiais para que o produto final tenha o padrão de qualidade mais elevado que as gerações anteriores.

Assim, o conjugar dos mundos de engenharia de materiais, mecânica, física e de superfícies é uma mais valia para a obtenção de resultados tecnologicamente mais avançados com a criação e desenvolvimento de um tema onde existe correlação das áreas de engenharia mencionada anteriormente, onde o desafio é elevado devido à saída de uma área científica específica, tornando esta dissertação única onde o assunto abordado tem um desenvolvimento muito baixo.

## 1.3 Importância do tema

A superfície de um produto tem uma grande importância para o cliente pois é o primeiro impacto sentido, o visual. Deste modo, a qualidade da superfície e o seu revestimento são

fatores que os produtores têm que ter em consideração e desenvolver cada vez mais os métodos de produção para que a qualidade superficial se destaque facilmente dos concorrentes.

Uma das principais dificuldades sentidas pela indústria é o revestimento dos seus produtos não metálicos e, principalmente, os polímeros injetados. Apesar das inúmeras vantagens de acoplar peças poliméricas aos produtos da indústria automotiva, os polímeros apresentam uma fraca capacidade de aderir revestimentos e ainda uma grande complexidade em obter superfícies de qualidade elevada.

## **1.4 Objetivos**

Com este trabalho é pretendido desenvolver conhecimento relativo à superfície de polímeros injetados, conhecer os mecanismos por detrás do processo para uma possível manipulação com vista à obtenção de resultados mais favoráveis para a indústria.

É também espectável a aprendizagem de manuseamento do software Moldflow e como utilizar o método de elementos finitos corretamente para a análise dos problemas propostos.

## **1.5 Estrutura do trabalho**

A dissertação inicia-se com o capítulo 1 onde é descrito o problema, apresentando o englobamento geral e a contextualização dentro da empresa onde leva à apresentação da motivação do trabalho, a importância do tema e os objetivos da dissertação. O capítulo 2 apresenta o Estado da Arte onde é ilustrado a inserção do tema da dissertação e onde é possível adquirir o conhecimento dos mecanismos e soluções já existentes, promovendo assim um desenvolvimento contínuo do tema. Segue-se o capítulo 3 onde é apresentado o software, regras de malhagem e os instrumentos a utilizar. Neste capítulo é também apresentado toda a simulação e comparação com medições, onde posteriormente são apresentadas conclusões dos vários assuntos abordados. No capítulo 4 é apresentado uma validação de resultados em que o mesmo estudo é feito com peças diferentes para reforçar os resultados do primeiro estudo. Esta validação é necessária devido à falta de meios científicos para verificação de resultados.



## 2 Estado de Arte

### 2.1 Polímeros

A grande parte dos materiais poliméricos utilizados na injeção de plástico são os termoplásticos. Estes materiais caracterizam-se por serem recicláveis devido às suas propriedades viscosas quando aquecidos e à sua solidificação quando arrefecido, o que leva a uma extrema facilidade em moldar o material a qualquer forma por mais complexa que esta seja. Todas estas funcionalidades são possíveis pelo facto de os termoplásticos apresentarem uma estrutura ramificada e linear. Já os termoendurecíveis não são muito utilizados pois não têm a capacidade de serem reciclados, visto que, uma vez moldados, já não voltam a fundir, formando peças com características frágeis e resistentes. Por último, os elastómeros são o tipo de polímero que apresenta a maior elasticidade, não sendo fundíveis, logo também não são recicláveis [2].

Dentro dos termoplásticos, estes podem ainda dividir-se em: amorfos, semi-cristalinos, liquido-cristalino e ainda termoduros.

#### 2.1.1 Amorfos

A característica fundamental dos polímeros amorfos é o facto de não apresentarem qualquer padrão na sua constituição, mas sim cadeias de moléculas desorganizadas. Este tipo de polímero, é facilmente moldável durante o enchimento do molde, sendo que, ao arrefecer, adquire propriedades rígidas e mobilidade molecular reduzida. Devido a estas propriedades, é um polímero pouco resistente à fadiga, mas com pouca contração tornando-os adequados para projetos onde as tolerâncias dimensionais apresentam maior restrição [2].

#### 2.1.2 Semi-Cristalinos

O tipo de polímeros designado por semi-cristalinos são aqueles que apresentam na sua constituição partes com total desordem (igualmente aos amorfos), mas com cadeias lineares e organizadas, ou seja, partes com uma estrutura cristalina. Quando a temperatura é elevada

acima do ponto de fusão, a estrutura torna-se amorfa na totalidade conferindo-lhe as boas propriedades de mobilidade, sendo que, na fase de solidificação, tem a capacidade de recuperar a sua estrutura semi-cristalina inicial. Devido à sua estrutura, este tipo de polímero apresenta maior resistência à fadiga que a estrutura amorfa. A contração volumétrica dos polímeros é maior quanto maior for o seu grau de cristalinização [2].

### 2.1.3 Líquido-Cristalino

Os polímeros líquido-cristalinos (100% cristalinos) são denominados líquido-cristalino pois são os únicos que na sua forma fundida continuam a apresentar uma estrutura 100% cristalina, contrariamente ao semi-cristalino que na sua forma de fundido apresenta uma estrutura amorfa. Este tipo de polímero não é recomendado para a injeção de plástico pois, devido à sua estrutura, é muito rígido o que resulta de uma baixa viscosidade a quando da fase fundida, resistência térmica e baixa estabilidade no controlo dimensional [2].

### 2.1.4 Termoduros

Os termoduros são polímeros que reagem termicamente criando ligações por pontos às várias cadeias (cross-linking). Este tipo de estrutura caracteriza-se por não ser diretamente reciclável, serem difíceis de trabalhar, requererem moldes especiais e praticas também especiais. Porém, este tipo de termoplásticos apresenta vantagens no seu uso que são a elevada resistência a esforços mecânicos, bom controlo dimensional e resistência térmica [2]. Contudo, por não ser facilmente reciclável e com muitas dificuldades presentes no seu processamento, este tipo de material fica limitado relativamente à sua aplicabilidade.



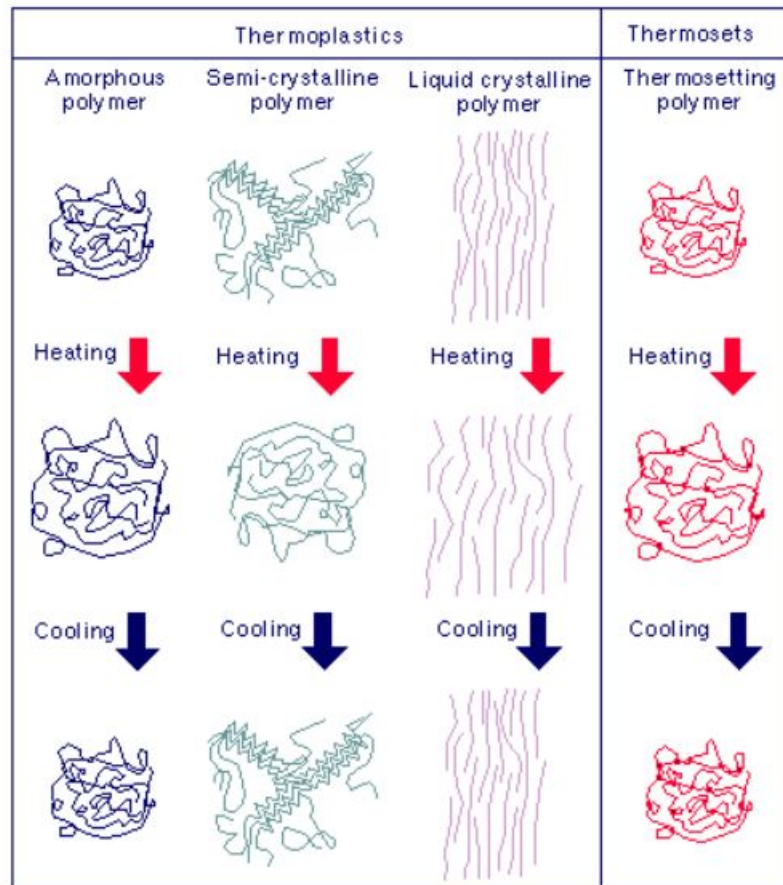


Figura 1 - Tipos de termoplásticos,[3]

## 2.2 Comportamento mecânico dos polímeros

A reologia é a ciência que estuda o comportamento dos materiais relativamente às suas deformações e escoamentos. Este ramo trata o estudo do fluxo do material visando as propriedades viscosas, plásticas e elásticas do material. A viscosidade é a medida de resistência de um fluxo no seu escoamento. Este parâmetro decompõe-se em 3 vetores:

- Viscosidade Aparente
- Viscosidade Cinemática
- Viscosidade Absoluta

A viscosidade aparente é medida com a tensão de corte constante num único ponto do escoamento, onde é necessário utilizar um viscosímetro para obter um resultado. No caso da viscosidade cinemática, esta é medida com um cronómetro através da ação gravítica, quando maior for o intervalo de tempo que o fluido demora a percorrer uma determinada distância, maior é a viscosidade desse fluido. Relativamente à viscosidade absoluta, esta é em tudo semelhante à cinemática, apenas difere no facto que a força gravítica não é usada proporcionando resultados mais fiáveis visto que a força gravítica não é constante. Geralmente, a viscosidade absoluta utiliza-se para resultados muito precisos.

## 2.3 Máquina de Injeção

A máquina injetora, representada na Figura 2, é a responsável pela passagem do polímero granulado para a peça final moldada. Este equipamento apresenta 3 unidades que constituem a máquina de injeção, a unidade de injeção, a montagem do molde e a unidade de força de fecho.

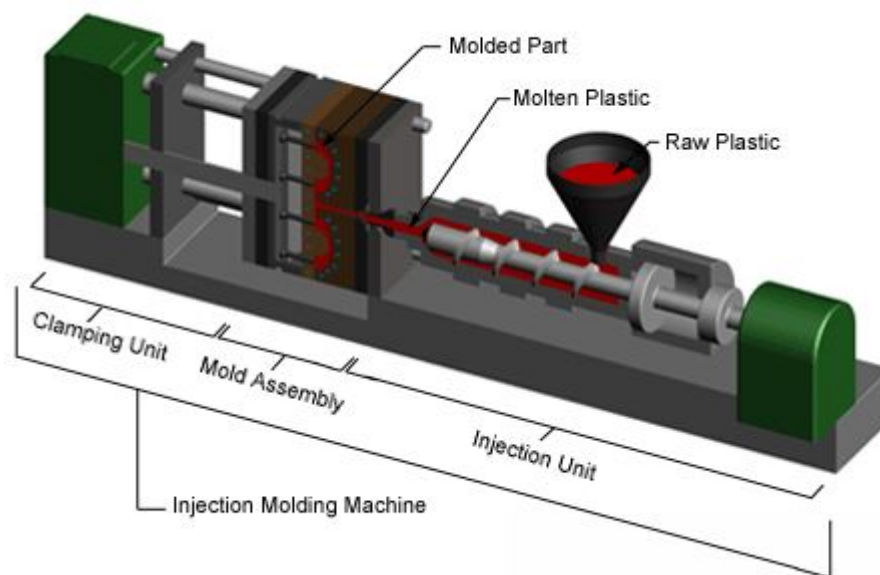


Figura 2 – Máquina de Injeção,[4]

### 2.3.1 Unidade de Injeção

Na unidade de injeção, representada na Figura 3, temos presente o funil onde é colocado o granulado de polímero que por sua vez entra no cilindro onde estão presentes resistências elétricas que fundem o granulado e, acionado por um motor geralmente elétrico, faz rodar um fuso que transporta o fundido para o bico de injeção. Este fuso é responsável pelo transporte da matéria prima, pela compressão e homogeneidade do fundido e ainda ajuda como fonte de calor devido ao atrito causado pelo transporte e compressão.

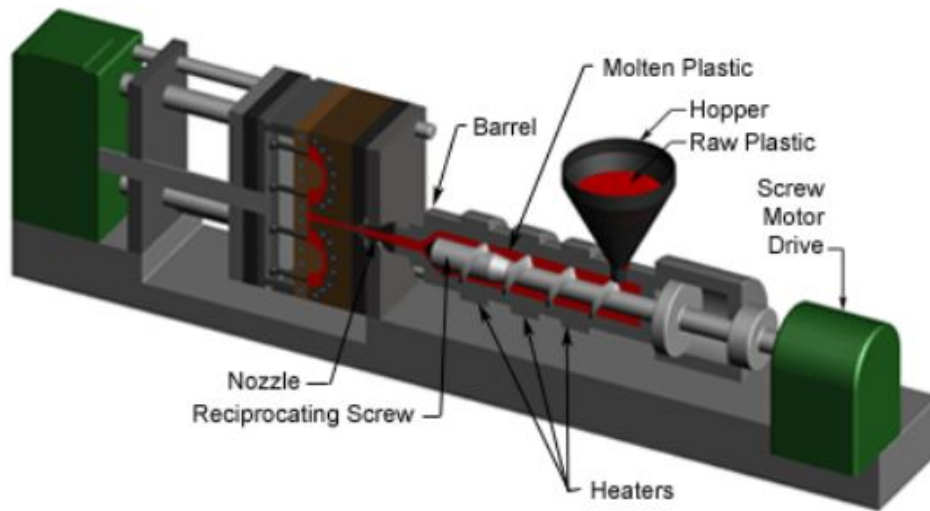


Figura 3 - Unidade de Injeção,[4]

### 2.3.2 Unidade de Fecho

Na unidade de fecho, representada na Figura 4, temos presente todo o mecanismo de fecho e abertura do molde, responsável também por manter uma pressão elevada na peça até à sua solidificação. Este mecanismo geralmente é hidráulico, havendo também o mecanismo elétrico.

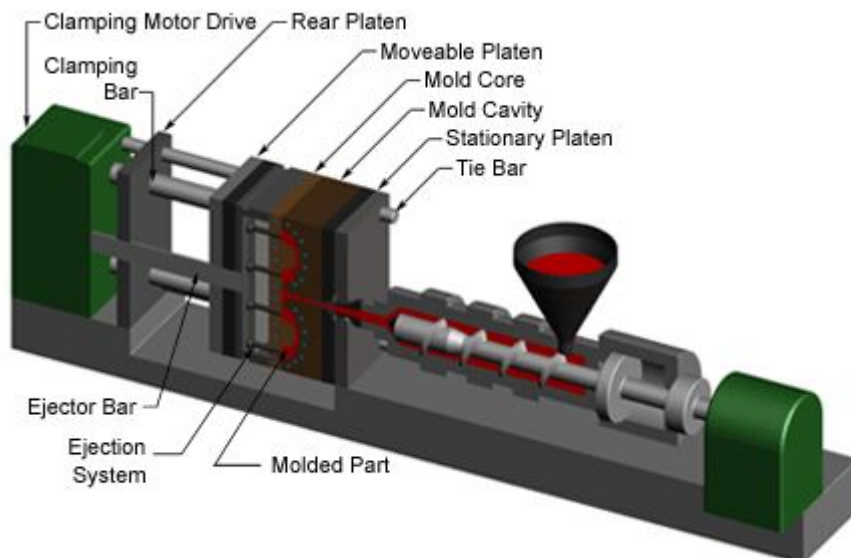


Figura 4 - Unidade de fecho,[4]

Apesar de existir os vários tipos de mecanismos, existe máquinas de injeção totalmente elétricas, tal como máquinas totalmente hidráulicas.

Estas máquinas podem ainda ser divididas por máquinas horizontais (representada nas figuras acima) e máquinas verticais. As máquinas verticais têm a vantagem de ocupar menos espaço, possibilita e facilita a montagem de moldes de maior dimensão e mais pesados e ainda consegue melhores balanceamentos nos enchimentos de peças em moldes de multi-cavidade devido à direção da força de gravidade.

### 2.3.3 Molde

O molde, representado em vista explodida na Figura 5, é uma das partes cruciais da injeção de plástico. Este é geralmente definido por ser a parte negativa da peça final, ou seja, tem envolvido no seu projeto tolerâncias dimensionais muito apertadas o que encarece muito a sua produção. Em geral, também os materiais utilizados são de elevado custo, pois geralmente são aços com elevada resistência à corrosão, ao desgaste e ainda com a particularidade de serem maus condutores de calor por forma a terem uma temperatura constante no molde durante todo o processo de injeção.

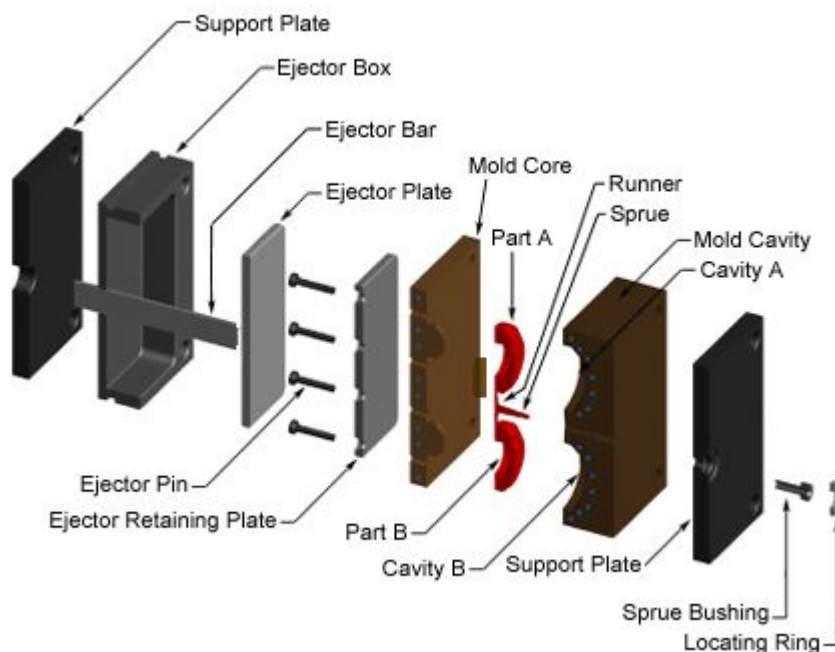


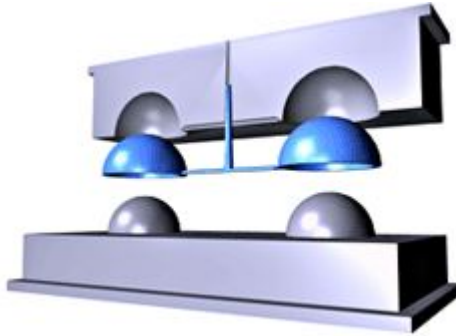
Figura 5 - Molde com vista explodida,[4]

Ainda relativo aos moldes, temos 3 tipos deste componente:

- Molde convencional (2 placas)
- Molde de 3 placas
- Molde de canais quentes

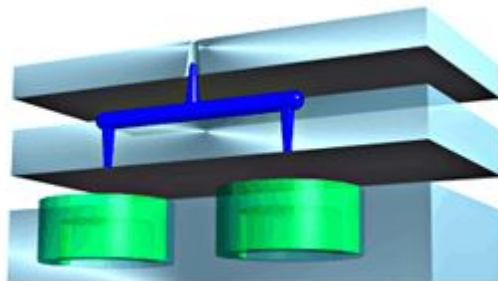
A grande diferença entre estes moldes é a possibilidade de obtenção das peças finais com ou sem os canais de alimentação, sendo que esta é a particularidade do molde

convencional, pois, em contraste com os moldes de 3 placas e canais quentes, os canais de alimentação fazem parte da peça à saída do molde, sendo removidos numa operação posterior. Os moldes podem ainda dividir-se em cavidade única ou em multi-cavidade, onde a única diferença é o número de peças produzidas por cada ciclo de injeção, sendo que uma peça por ciclo é num molde de cavidade única, mais que uma por ciclo é denominado multi-cavidade.



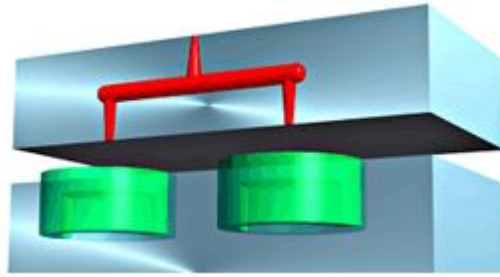
*Figura 6 - Molde de 2 placas,[5]*

Na Figura 6 temos representado um molde convencional e multi-cavidade pois a cada ciclo de injeção produz mais que uma peça final. Este tipo de molde é o mais habitualmente usado devido a serem mais simples de produzir, apresentarem um custo baixo e consequentemente apresentam também um tempo de vida curto.



*Figura 7 - Molde de 3 placas,[6]*

Nos moldes de 3 placas, representado na Figura 7, apresenta as peças finais já separadas dos canais de injeção no fim do ciclo injeção. Este tipo de molde apresenta problemas relativos às elevadas pressões necessárias para o correto enchimento, o material dos canais de injeção é desperdiçado e apresenta um tempo de extração da peça maior devido também aos canais de injeção. Porém, tem vantagens relativas ao concorrente direto (molde de canais quentes) sendo mais económico e simples de produzir, revela menor degradação nas peças de polímeros termicamente sensíveis e apresenta maior resistência que um molde de canais quentes.



*Figura 8 - Molde de canais quentes,[7]*

Os moldes de canais quentes, ilustrado na Figura 8, apresentam vantagens interessantes relativamente aos anteriores. São vantajosos por:

- Menor desperdício de material
- Marcas de ataque quase inexistentes
- Tempos de ciclo mais baixos
- Excelente controlo do enchimento do molde e do fluxo do material

Apesar de todos os pontos positivos, apresenta também aspetos negativos:

- Elevado custo inicial
- Dificuldade em alterar a cor do material
- Maior probabilidade de quebra
- Não utilizável com materiais termo sensíveis

## **2.4 Etapas da Injeção de Plástico**

A injeção de plástico é um processo automatizado e de alta velocidade usado para produzir as mais complexas formas em peças de plástico. Este processo abrange quase todo o leque de dimensões, desde a peça de milímetros, até às dimensões de vários metros. É importante reconhecer que todo o processo de obtenção da peça final passa pelo desenho da mesma, sendo que a forma exterior, a espessura, os reforços internos e todos os detalhes da peça afetam diretamente todos os parâmetros do processo que são:

- Enchimento do molde
- Compactação
- Arrefecimento
- Extração da peça

Na primeira etapa, o enchimento do molde, este encontra-se fechado com ar na cavidade que sairá pelos canais de ventilação dando lugar ao fundido. Nesta etapa é crucial definir os seguintes parâmetros:

- Velocidade de Injeção

### ➤ Switch-over

Tanto a pressão de injeção como o tempo de injeção, são dependentes da velocidade de injeção, controlados primariamente pela posição do fuso e secundariamente (caso existam) pelas válvulas de ataque. Todas estas variáveis estão ligadas ao caudal de fundido que é imposto ou limitado pela máquina. No caso do tempo de injeção, este terá uma influência massiva no tempo de ciclo de produção das peças, sendo que existe o objetivo de minimizá-lo ao máximo. Em aspetos fisiológicos, este parâmetro influencia a velocidade de distorção, a temperatura da frente chama e a pressão à qual o fluído é comprimido durante a injeção. Relativamente à velocidade de distorção, esta irá aumentar com a diminuição do tempo de injeção, o que levará ao aumento das tensões residuais.

No caso do switch-over, temos a ligação entre a fase de injeção e a fase de compactação, onde é feita a passagem de velocidade controlada de injeção para pressão controlada de injeção, garantindo assim o enchimento total da peça e reduzindo o risco de “flow back”, onde existe um movimento contrário ao da direção de injeção por parte do fundido.

Na segunda etapa do processo, a compactação, o molde encontra-se totalmente preenchido, estando o fundido sobre pressão até se concluir a sua solidificação. Para esta etapa, os parâmetros chave são:

- Pressão de compactação
- Força de fecho (molde)
- Tempo de compactação

A pressão de compactação é um dos parâmetros mais importantes no que diz respeito à qualidade final da peça. Este influencia as tolerâncias dimensionais, o empeno, a contração volumétrica, os rechupes provenientes da produção da peça e ainda garante que toda a cavidade está preenchida. Também a força de fecho do molde é algo a ter em muita consideração, pois se esta força for reduzida existirá o aparecimento de rebarbas na peça e consequentemente o controlo dimensional da mesma é afetado. Por outro lado, se a força de fecho for muito elevada teremos problemas relacionados com o desgaste prematuro do molde, deformações das cavidades, quebra dos pinos extratores, estreitamento dos canais de injeção e ventilação, entre outros. Já o tempo de compactação, apenas é controlado pelo arrefecimento do jito, visto que após este solidificar, não existe mais necessidade de exercer pressão.

Na terceira etapa, o arrefecimento, tem como objetivo ser o mais curta possível com a finalidade de reduzir o tempo de ciclo, porém, esta etapa, é crítica no que diz respeito ao aparecimento de tensões residuais na peça, tensões residuais na superfície da peça e ainda os empenos presentes na mesma. Tem-se como objetivo um arrefecimento uniforme e controlado para a obtenção de bons resultados dimensionais e boas qualidades superficiais.

Por fim, a extração da peça do molde é a última etapa a cumprir para a conclusão do processo de produção por injeção de plástico que é necessário ter algumas considerações a fazer. Teoricamente, a extração da peça deveria ser quando esta estivesse totalmente solidificada para garantir que não teremos diferentes estados físicos presentes na mesma peça.



Apesar de os moldes serem aquecidos para evitar choques térmicos e ter arrefecimentos uniformes ao longo da peça, a superfície da mesma é a que solidifica em primeiro lugar. Isto leva-nos a um gradiente de solidificação do exterior para o interior da peça. Com isto, é possível manter a forma final da peça mesmo que o seu interior ainda apresente estados viscosos. Na indústria, geralmente extrai-se as peças quando estas apenas apresentam 80% de volume solidificado, pelo que no projeto é necessário ter em conta esta prática industrial.

## 2.5 Revestimento das peças plásticas

Atualmente o número de componentes plásticos na indústria automóvel é muito elevado. O automóvel é um produto de grande impacto na sociedade atual cuja indústria se tornou uma das mais competitivas à escala global. O grau de exigência por parte dos utilizadores é muito elevado, requerendo um aspeto perfeito. Estas peças com elevado nível de exigência são denominadas de peças de classe A. As peças de classe A são as que estão ao nível do olhar do cliente onde a qualidade e apresentação da superfície é um requisito chave para a venda do produto. Isto sugere que a pintura destes componentes terá de ser perfeita.

### 2.5.1 Adesão

A adesão é a interação interatômica e intermolecular na interface de duas superfícies. É um tópico multidisciplinar que inclui química de superfície, física, reologia, química de polímeros, análise da tensão superficial, análise de física e fratura de polímeros.

Descrever o mecanismo de adesão em termos simples é difícil devido à complexidade e evolução da compreensão do assunto. Os mecanismos de adesão são conhecidos por serem dependentes das características da superfície dos materiais. Especialmente nos últimos 30 anos, o entendimento dos mecanismos de adesão aumentou significativamente, pois as várias indústrias procuraram materiais alternativos para redução do peso e com custos reduzidos relativamente aos materiais metálicos. Este impulso tem sido a maior influência na necessidade entender a adesão de revestimentos aos polímeros e resolver o problema sobre a interação entre as faces no processo de adesão. Nos últimos tempos, o interesse do setor em adesão tem sido direcionado para polímeros e resinas epóxi devido ao seu volume vantajoso e propriedades de superfície, baixo custo e boas propriedades mecânicas.

O trabalho de adesão é dado por:

$$W_{ls} = \sigma_s + \sigma_l - \sigma_{ls}$$

*Equação 1 - Trabalho de adesão*

Onde,  $\sigma_s$  representa a tensão superficial do sólido,  $\sigma_l$  representa a tensão de superfície do líquido e  $\sigma_{ls}$  representa a tensão intersuperficial líquido-sólido, em que estas tensões são dadas em energia por unidade de área.

Para um limite de fase líquido-sólido, o trabalho de adesão ( $W_{ls}$ ), Equação 1, pode ser calculado a partir do ângulo de contato  $\theta$  usando a equação de Young:



$$W_{ls} = \sigma_l * (1 + \cos \theta)$$

*Equação 2 - Trabalho de adesão através do ângulo de contacto*

Onde,  $\theta$  representa o ângulo de contacto.

O trabalho de adesão, Equação 2, é uma medida da força de contacto entre duas fases. O seu conhecimento é importante para processos como revestimento, pintura, limpeza, entre outros [8]–[11].

Como vimos anteriormente, a adesão é influenciada pelas tensões envolvidas no contacto entre as duas superfícies, o que levou há necessidade do estudo dessas tensões e das suas interações.

### 2.5.2 Coesão

A coesão é a atração mútua das moléculas. É uma propriedade intrínseca em certas substâncias que é causada pela estrutura e forma das suas moléculas.

Quando uma fase líquida entra em contacto com uma segunda fase líquida ou sólida, a tendência de difusão do líquido é dada pela relação entre o trabalho de coesão e o trabalho de adesão na molhagem. Se o trabalho de coesão for maior, o líquido não se irá espalhar, por outro lado, se o trabalho de adesão for maior, o líquido vai-se propagar facilmente.

Como foi criado duas novas superfícies, o trabalho de coesão é dado por:

$$W_{coh} = 2 * \sigma_l$$

*Equação 3 - Trabalho de coesão*

Assim, através da Equação 3, podemos concluir que é importante ter uma tensão superficial no líquido elevada para não existir separação das partículas que constituem o líquido, porém a se a tensão superficial do líquido for muito elevada, este não irá espalhar pelo substrato.

### 2.5.3 Energia Superficial

Para existir adesão de revestimentos líquidos (i.e. tinta), é necessário ter em conta a energia de superfície dos materiais. Um problema comum no revestimento dos polímeros é a incompatibilidade dos materiais, visto que os polímeros são geralmente difíceis de molhar e a água é a base das tintas dos tempos atuais. O objetivo é molhar toda a superfície, como ilustrado na Figura 9, onde devemos seguir o sólido B:



Figura 9 - Exemplo de molhabilidade,[12]

Para se obter a molhabilidade perfeita da superfície, temos então que aumentar a energia de superfície, como ilustrado na Figura 10, onde o ângulo de contacto está representado relativamente ao substrato:

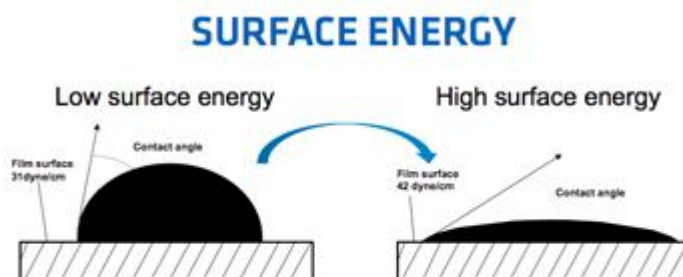


Figura 10 - Energia de superfície e molhabilidade,[13]

#### 2.5.4 Tratamentos para aumento da energia superficial

Existem tratamentos que se podem fazer aos materiais poliméricos que aumentam a energia de superfície, como por exemplo:

- Corona
- Plasma
- Flameado
- Térmico

O tratamento Corona consiste em fazer descargas elétricas com alta frequência sobre a superfície da peça quebrando assim as longas cadeias de moléculas e criando camadas valentes livres [13].

O tratamento com Plasma de superfícies de polímeros causa locais ativos nas superfícies que ficam sujeitos a fenómenos de oxidação. Os fenómenos de oxidação são caracterizados pela absorção de partículas levando a estados de equilíbrio termodinâmico favoráveis através da reestruturação de processos e difusão. Assim, a superfície com alta energia tem tendência a absorver contaminantes da atmosfera para reduzir a sua energia superficial [14].

Os tratamentos térmico e flameado têm o mesmo princípio de funcionamento, sendo que ambos fornecem energia térmica à superfície do polímero com vista à quebra das longas

cadeias moleculares do polímero, dando assim níveis da camada valente livres, aumento a sua energia superficial e consequentemente a adesão da mesma.

### 2.5.5 Medição da energia livre de superfície

Com a percepção do conceito de energia livre de superfície, foi então posto em estudo formas para a medição da mesma, conseguindo assim se obter informações importantes sobre o comportamento de determinadas tintas sobre os substratos poliméricos.

Hoje em dia já existem métodos automáticos para medir a energia livre de superfície, porém, a base de todos esses métodos incide em colocar uma gota de um líquido com tensão superficial conhecida sobre a superfície a analisar e medir o ângulo que a gota faz com a superfície. Os métodos mais avançados, através de câmeras perfeitamente alinhadas, retiram as imagens para o computador, medindo o ângulo que a gota faz com a superfície a analisar, tal como ilustrado na Figura 11:

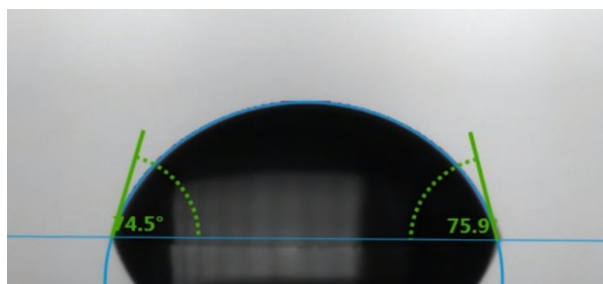


Figura 11 - Ângulo de contacto,[12]

Através destes ângulos é possível obter uma medida indireta da molhagem que determinado líquido tem sobre a superfície.

A KRÜSS é uma empresa unicamente dedicada a este tipo de equipamentos, que têm possibilidades suficientes para toda a medição rigorosa da energia de superfície, onde é possível medir a parte polar e apolar do substrato e assim garantir a informação necessária para a fabricação de uma tinta adequada à superfície a ser revestida. Porém, o preço dos equipamentos é um fator eliminatório na decisão de aquisição pela maioria das empresas que operam neste ramo. Assim, a indústria opta em geral pela compra de umas canetas com líquidos, ilustradas na Figura 12, onde a sua energia superficial é conhecida e assim, consegue-se chegar a um valor aproximado da energia superficial do substrato, bastando para isso fazer um risco com a caneta e analisando o comportamento do líquido. Este método não incide sobre a análise dos ângulos de uma gota de líquido, porém também não fornece valores da energia superficial da peça, sendo assim designado um método comparativo e pouco rigoroso.



*Figura 12 - Canetas de medição comparativa da energia superficial, da marca Arcotest*

a) **Equação de Young**

O ângulo de contacto é a medida encontrada para medir a molhabilidade de uma superfície relativa a um líquido. Existem dois tipos de ângulos de contacto, estático e dinâmico. O ângulo de contacto estático é medido quando o sistema está imóvel, sendo determinado após o equilíbrio das tensões intersuperficiais. O ângulo de contacto dinâmico é determinado quando o sistema ou a superfície líquida está em movimento. Este é determinado por um equilíbrio entre a força intersuperficial e a força viscosa.

A equação de Young vem traduzir a relação entre o ângulo de contacto, a tensão superficial do líquido, a tensão interfacial liquido-sólido e a energia livre de superfície do sólido.

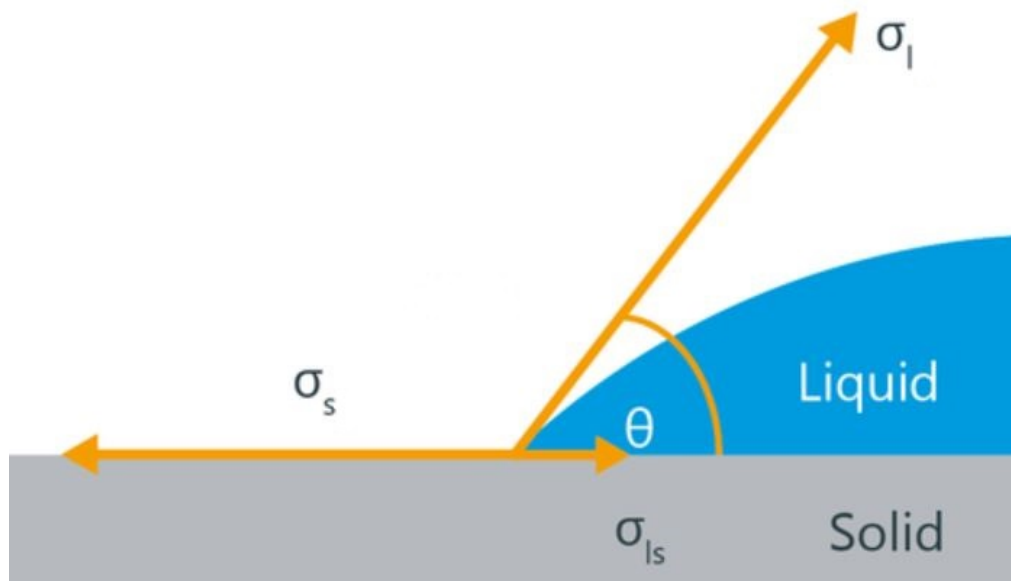


Figura 13 - Esquema da equação de Young,[15]

Na Figura 13, temos representado o esquema da equação de Young sendo fácil chegar à sua equação, bastando para isso fazer o equilíbrio das tensões:

$$\sigma_s = \sigma_{ls} + \sigma_l * \cos(\theta) \Leftrightarrow \theta = \cos^{-1} \left( \frac{\sigma_s - \sigma_{ls}}{\sigma_l} \right)$$

Equação 4 - Equação de Young

Pela Equação 4, é possível verificar que, mantendo a tensão superficial líquido ( $\sigma_l$ ) e interfacial sólido-líquido ( $\sigma_{ls}$ ) constante, o ângulo de contacto ( $\theta$ ) sofre um incremento com a redução da tensão superficial sólido ( $\sigma_s$ ).

O equilíbrio estável apenas é atingido sobre o cumprimento dos seguintes fatores relativos à superfície:

- ⇒ Rigidez elevada e imóvel
- ⇒ Lisa, suave e regular ( $\ll 0.5 \mu\text{m}$ )
- ⇒ Composição homogénea
- ⇒ Não pode existir qualquer tipo de interação entre o líquido e a superfície do sólido

Muitas destas condições não são satisfeitas quando se trata de materiais poliméricos, o que significa que a tensão superficial do sólido não será exatamente a descrita pela equação. Assim, o que a equação descreve será a tensão superficial do sólido quando este absorve o vapor que envolve o líquido, ou seja, a atmosfera que envolve o cenário [11].

Pela equação é possível concluir que:

$$\Rightarrow \sigma_s > \sigma_{ls}, \theta < 90^\circ$$

$$\Rightarrow \sigma_s < \sigma_{ls}, \theta > 90^\circ$$

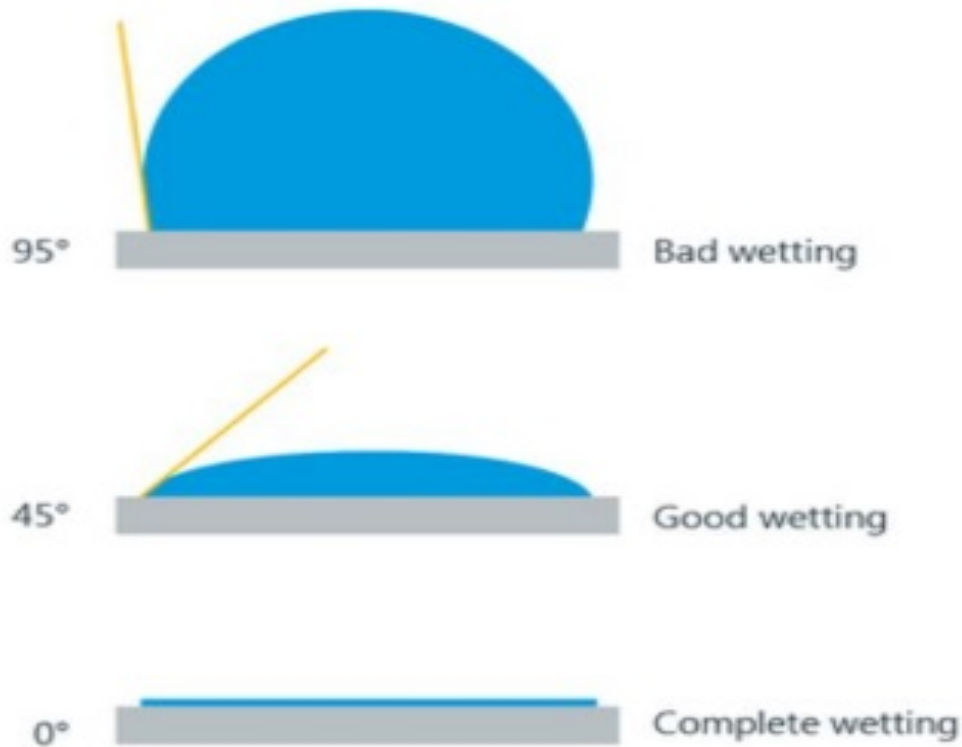


Figura 14 - Exemplo de molhagem com diferentes ângulos de contacto,[15]

Desta forma, Young descobriu que a molhagem completa ocorre quando a tensão superficial do líquido é inferior à tensão superficial do sólido, e consequentemente, que o ângulo de contacto diminui à medida que a tensão superficial do sólido aumenta [9]–[11], [15].

#### b) Método de Fowkes

O método de Fowkes é uma variante da equação de Young com a adição da parte dispersiva e não-dispersiva ou polar da energia de superfície. De acordo com Fowkes, a parte dispersiva é a parte da energia livre de superfície do sólido ou a tensão superficial do líquido que apenas interage dispersivamente. Isto significa que para calcular a energia livre de superfície do sólido, calcula-se o ângulo de contacto utilizando um líquido puramente dispersivo. Para a parte não dispersiva, usa-se um líquido não dispersivo para calcular novamente o ângulo de contacto.

Com estas variáveis conhecidas, podemos chegar à conclusão de Fowkes, representada na Equação 5:

$$\sigma_s = \sigma_s^D + \sigma_s^P$$

*Equação 5 - Equação básica do Método de Fowkes*

Onde,  $D$  representa a parte dispersiva e  $P$  a parte Polar.

A tensão superficial total será a soma da tensão superficial dispersiva, com a tensão superficial polar.

Fowkes, chegou ainda a uma expressão que relaciona a tensão superficial líquido-líquido:

$$\sigma_{12} = \sigma_1 + \sigma_2 - 2\sqrt{\sigma_1^D \sigma_2^D}$$

*Equação 6 - Relação da tensão superficial líquido-líquido do Método de Fowkes*

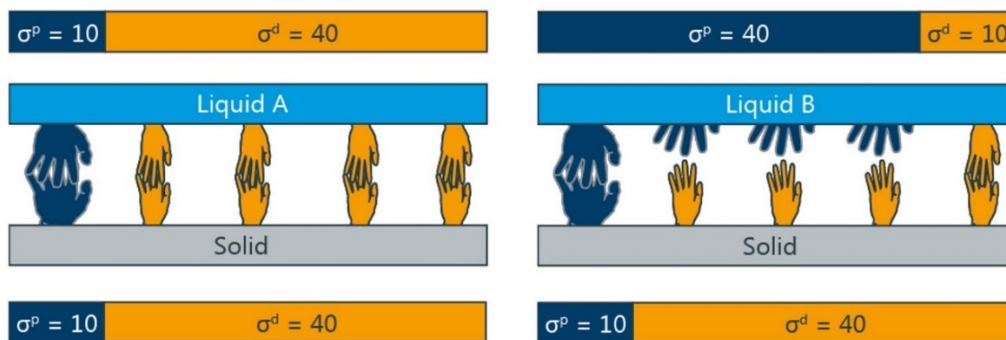
Na Equação 6, Fowkes considera que os líquidos são perfeitamente dispersos, ou seja, a sua parte polar é inexistente. Sugeriu ainda uma relação sólido-líquido não contabilizando a parte polar dos elementos a ligar, dando assim a expressão:

$$\sigma_{sl} = \sigma_s + \sigma_l - 2\sqrt{\sigma_s^D \sigma_l^D} \quad [8]-[10], [16], [17].$$

*Equação 7 - Método de Fowkes relação sólido-líquido*

### c) Método de Owens, Wendt, Rabel and Kaelble (OWRK)

O método OWRK é um desenvolvimento do método de Fowkes. Este método consiste em ter pelo menos dois líquidos com partes dispersas e polares conhecidas de forma que, a tensão intersuperficial depende se as partes polares e dispersas podem formar interações com partes correspondentes da fase adjacente. Por exemplo, a tensão intersuperficial em relação à água como o líquido polar é menor quando o sólido também é polar. As interações polares só fazem uma pequena contribuição para reduzir a tensão intersuperficial, isso corresponde a uma molhagem baixa e, conseqüentemente, a um ângulo de contacto elevado



*Figura 15 - Ilustração das ligação tendo em conta a polaridade das superfícies, adaptado de[18]*

Assim, o método de OWRK pode ser descrito pela equação:

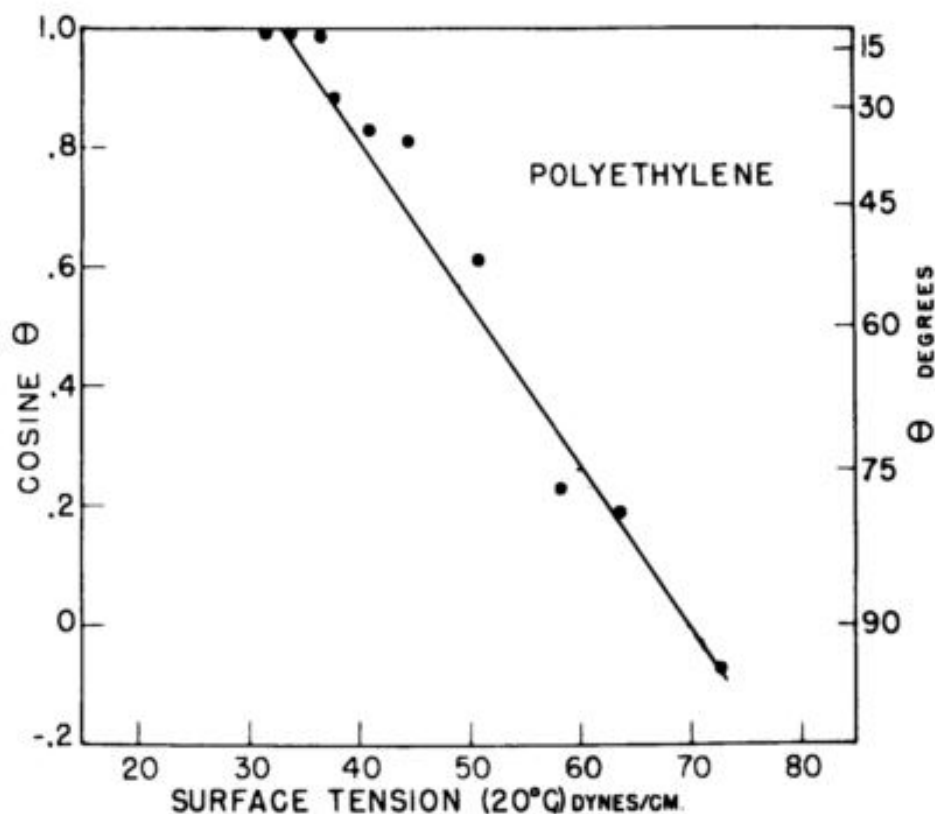
$$\sigma_{sl} = \sigma_s + \sigma_l - 2\sqrt{\sigma_s^D \sigma_l^D} - 2\sqrt{\sigma_s^P \sigma_l^P}, [19]$$

*Equação 8 - Método de OWRK*

Atualmente, é a expressão mais completa relativamente aos fenómenos que têm em conta as tensões produzidas na interação sólido-líquido.

#### d) Método de Zisman

O método de Zisman, consiste em achar a tensão superficial crítica que segundo Zisman é a tensão superficial na qual o líquido cobre por completo o sólido. As iterações são então feitas por líquidos com a tensão superficial conhecida e próxima da energia de superfície, posteriormente traçada contra o ângulo de contacto. O valor da tensão superficial da equação de regressão para ângulo de contacto 0° corresponde à tensão crítica da superfície [20]. Zisman mostrou ainda com as suas medições que a tensão superficial do líquido ( $\sigma_l$ ) apresenta uma relação linear com o cosseno do ângulo de contacto  $\theta$ , como ilustrado na Figura 16:



*Figura 16 - Tensão superficial vs Ângulo de contacto por Zisman,[20]*



A combinação da equação de Young com a equação de OWRK, indica que existe uma relação entre a adesão e a tensão superficial do sólido e do líquido, pois com a combinação das duas é possível chegar a uma regressão linear ( $y = mx + b$ ), usando apenas operações matemáticas básicas, como representado na Equação 9:

$$\frac{\sigma_l(1 + \cos \theta)}{2\sqrt{\sigma_l^D}} = \sqrt{\sigma_s^P} \sqrt{\frac{\sigma_l^P}{\sigma_l^D}} + \sqrt{\sigma_s^D}$$

*Equação 9 - Equação de Zisman*

Onde

$$y = \frac{\sigma_l(1 + \cos \theta)}{2\sqrt{\sigma_l^D}}$$

$$x = \sqrt{\frac{\sigma_l^P}{\sigma_l^D}}$$

$$m = \sqrt{\sigma_s^P}$$

$$b = \sqrt{\sigma_s^D} \text{ , [21]}$$

e) Método de Wilhelmy

Todos os métodos vistos anteriormente têm um problema em comum, o tamanho da gota que é difícil de controlar e a força gravítica que influencia a forma da bolha, alterando o ângulo de contacto.

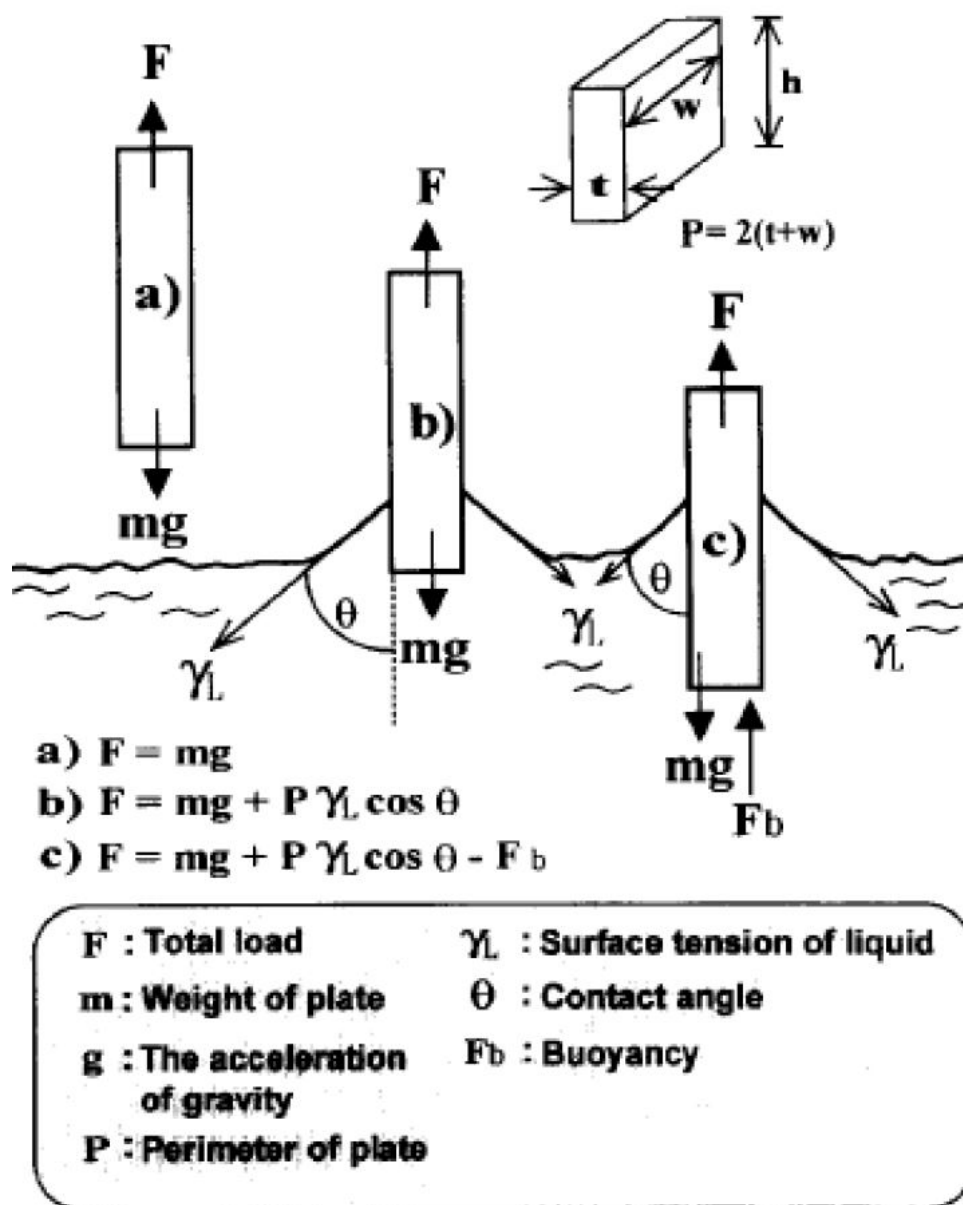


Figura 17 - Método da capilaridade ascendente de Wilhelmy.[11]

O método capilaridade ascendente de Wilhelmy, ilustrado na Figura 17, elimina os efeitos do tamanho da gota no contacto com a superfície e assim preserva uma uniformidade nas medidas do ângulo de contacto. Neste método, uma placa sólida é imersa verticalmente no líquido e mantido em posição vertical. A determinação do ângulo de contacto estático é feita a

partir do aumento capilar na placa vertical quando a placa está imóvel. Os ângulos de contacto dinâmicos são medidos quando a placa está em movimento.

O ângulo de contacto pode ser calculado a partir da medição da ascensão capilar por um catetómetro ou eletrobalança que regista a tensão total de molhamento na placa como representa na Equação 10:

$$\gamma_l \cos \theta = \frac{F}{P}$$

*Equação 10 - Método da capilaridade ascendente de Wilhemy*

As principais desvantagens da placa Wilhelmy é a correção de flutuabilidade que tem que ser feita. A tensão superficial não é medida diretamente, sendo medido o parâmetro  $\gamma_l \cos \theta$ , a molhagem completa da placa o (ângulo de contacto = 0°) é necessário para obter a tensão superficial. Este método também requer conhecimento da diferença de densidade entre o líquido e o vapor, a tensão superficial do líquido e a aceleração devido à gravidade [11].

## 2.6 Rechupes

Os rechupes são marcas de uma depressão sobre a superfície da peça moldada, que é umas das causas resultante da contração volumétrica. Trata-se de um fator que impede o sucesso das peças moldadas por injeção.

Durante o enchimento do molde, quando o fundido entra em contacto com a parede do molde, dá-se um arrefecimento repentino, e conseqüentemente, forma-se uma casca fina no redor do fundido que posteriormente sofre uma contração térmica do núcleo de fundido, onde pode resultar a marca de rechupe à superfície se não houver fundido suficiente para compensar essa contração. Estes problemas dão-se essencialmente onde há mudanças de espessura, reforços perpendiculares à direção do escoamento, ou mudanças de direções bruscas. Os efeitos das condições de processamento na formação de rechupes nas peças obtidas por injeção precisam de ser entendidos afim de reduzir este problema [22].

### 2.6.1 Fatores de aparecimento de rechupes

Devido à importância do tema a ser tratado, ao longo dos anos a indústria de injeção sentiu a necessidade de entender as causas dos rechupes e como evitá-las. Assim, através de alguns estudos, foi possível concluir que:

A espessura da peça e a pressão de compactação apresentam um impacto massivo no aparecimento de rechupes. Aumentando a pressão de compactação ou o tempo de compactação é possível reduzir os rechupes, isto porque a formação dos rechupes provém de uma contração de material fazendo com que o aumento da pressão de compactação e/ou tempo de compactação conseguem comprimir mais material diminuindo assim a contração volumétrica.

Também o aumento da espessura global pode diminuir os rechupes, porém este está altamente dependente da geometria da peça. Muitas vezes o aumento da espessura em valores excessivos, aumenta os rechupes, pois existe mais volume de material, logo uma contração

volumétrica maior. Porém, em peças de espessura muito reduzida, o aumento da espessura reduz as marcas de rechupes pois facilita o escoamento do material para todas as cavidades da peça.

Uma baixa temperatura de fusão leva a um baixo índice de rechupes, porém se a temperatura do fundido for demasiado baixa e afetar o fluxo do fundido, a sua compactação será deficiente e irá criar rechupes. Também a temperatura do molde afeta as marcas de rechupes presentes na peça.

Um tempo de injeção elevado, que causa uma baixa velocidade de injeção, irá criar um índice de rechupes mais elevado na peça, assim como um baixo tempo de injeção irá criar elevadas pressões durante o enchimento, o que dificulta o mesmo e, portanto, aumenta o índice de rechupes.

Também a localização do ataque é um parâmetro importante no que diz respeito aos rechupes, sendo importante aplicar o ataque nas secções mais espessas da peça. Isto permite que a compactação possa ser feita com eficiência, antes que as secções mais finas congelem [22].

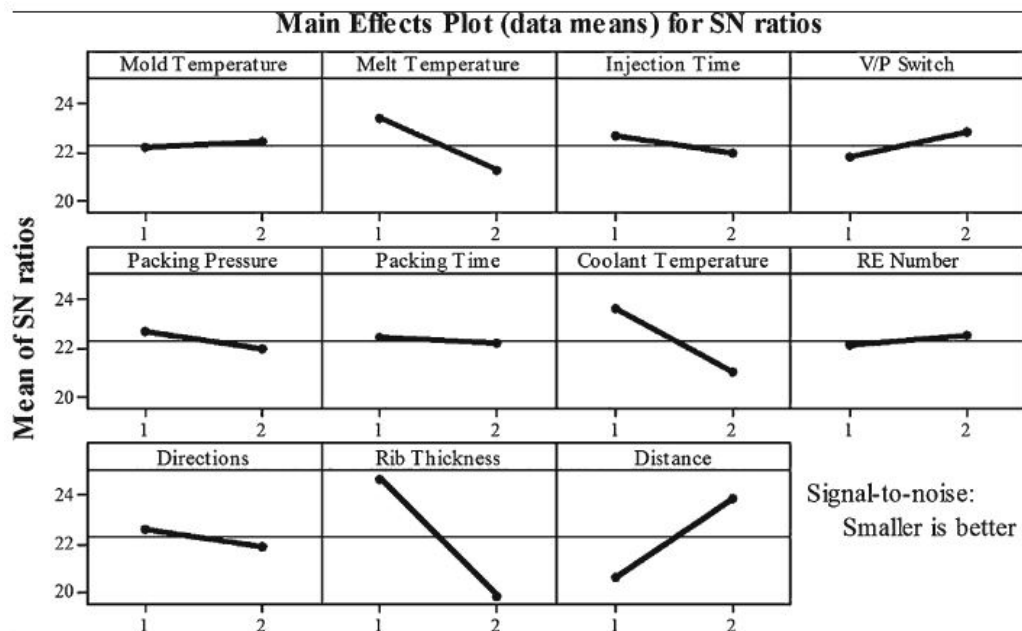
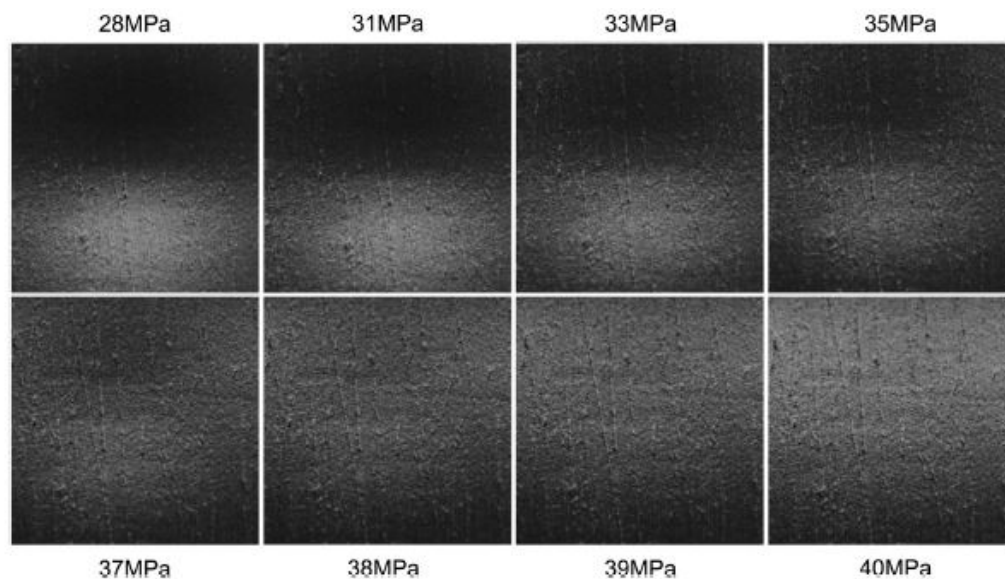


Figura 18 - Efeitos principais do aparecimento de rechupes,[23]

Na Figura 18, está representado uma DOE que relaciona as principais causas do aparecimento de rechupes, sendo de realçar que, quanto maior o declive da reta, maior a influência do parâmetro. Deste modo é de frisar que, para a experiência realizada, a espessura dos reforços e a distância do ataque à zona de aparecimento de rechupes, são os principais parâmetros a ter em conta num projeto onde o aparecimento de rechupes seja uma característica com maior prioridade de eliminação.

Apesar dos parâmetros acima mencionados terem uma elevada importância no que diz respeito ao índice de rechupes, a pressão de compactação apresenta um forte impacto também. Para o comprovar, o artigo [24] demonstra a influência da pressão de compactação:



*Figura 19 - Influência da pressão de compactação na profundidade dos rechupes.[24]*

Na Figura 19, é claramente visível o enorme impacto na profundidade do rechupe com apenas a variação de 1 MPa. Também é possível ver claramente a marca do rechupe a 37 MPa e com apenas uma diferença de 3 MPa, o rechupe é praticamente inexistente (40 MPa).

### 2.6.2 Medição de rechupes

A medição de rechupes é uma tarefa com elevada complexidade. No caso da indústria automóvel de gama média/baixa, esta medição é feita apenas visualmente, porém, em produtos de alta qualidade, a medição dos rechupes é geralmente feita por reflexão de um feixe de luz. Isto implica uma superfície o mais plana possível e um ambiente com ausência de luz ambiente, o que por vezes é difícil de conseguir, principalmente a planicidade das peças, visto que hoje em dia as peças apresentam curvaturas futurísticas e complexas.

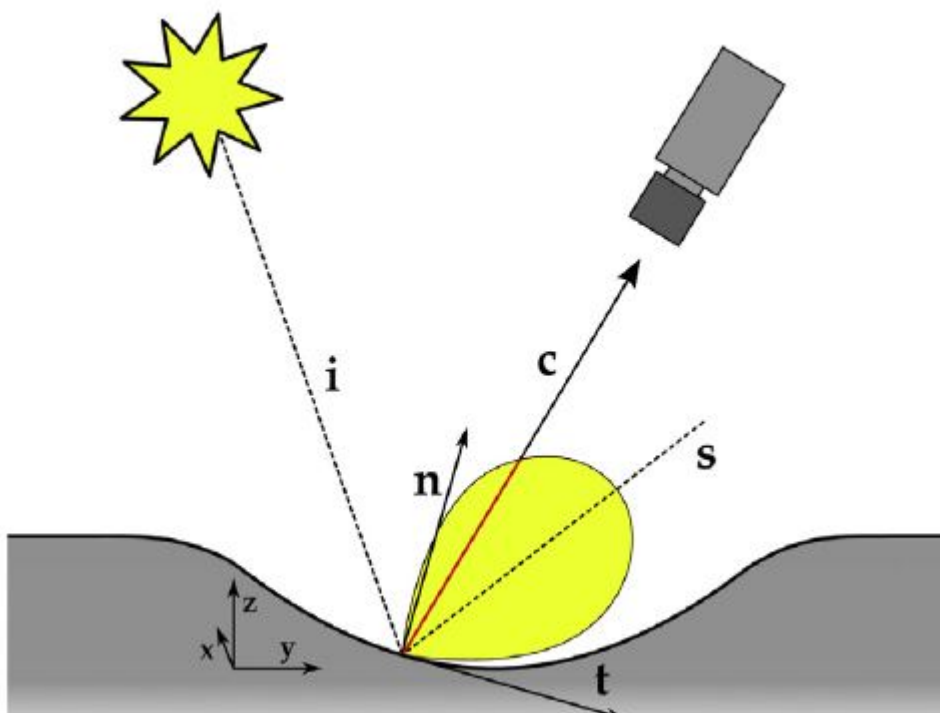


Figura 20 - Medição de rechupe,[24]

Na Figura 20 temos representado o reflexo da luz incidente (i) em uma superfície. A intensidade da luz refletida capturada pela câmera depende da relação entre a direção da reflexão especular (s) e do eixo óptico da câmera (c). (s) depende do vetor tangente local (t) da superfície refletora.

Consoante a quantidade de luz que é refletida conseguimos prever o brilho da peça e se tem um rechupe naquele local ou não.

Visto que as peças não são espelhadas, não se pode esperar que toda a luz emitida seja refletida, assim, a primeira etapa para medir um rechupe será medir numa parte plana da peça onde a probabilidade de aparecimento de um rechupe é mínima, ou seja, longe de reforços, de variações de espessura e dos limites da peça. Após esta medição, é imediato para o utilizador do aparelho, qual é a influência do brilho na reflexão da luz. Seguidamente a entender a diferença de valores relativos ao brilho, é possível passar às zonas onde os rechupe existirão e caso esses valores sejam inferiores aos retirados na primeira etapa, é conclusivo que a superfície apresenta uma irregularidade na zona medida, pois a intensidade da luz irá diminuir.

## 3 Metodologia

### 3.1 Software

Para ajudar na análise dos parâmetros da injeção de plástico, será usado o software Moldflow, como referido anteriormente. Este software é uma ferramenta de elevado desempenho no que diz respeito à simulação de peças produzidas por injeção e não só. Tal como outros softwares semelhantes, necessitamos de um modelo 3D CAD e sobre o mesmo contruir uma malha de elementos finitos para proceder ao cálculo. No caso do Moldflow, este tem 3 tipos de malhas possíveis, como ilustrado na Figura 21:



Figura 21 - Tipos de malha presentes no software Moldflow

A malha Midplane consiste na criação de um plano intermédio entre as superfícies da peça. Geralmente utiliza-se para peças de espessura muito reduzida.

No caso da Dual Domain, esta malha caracteriza a superfície da peça, como se esta apenas se tratasse de uma casca. É usada para fazer os primeiros estudos onde são definidos os parâmetros tempo de injeção, pressão de comutação, pressão de compactação onde é possível ter uma boa ideia inicial de quais vão ser os desafios principais da peça na sua produção.

Já na malha 3D, são contabilizados todos os acontecimentos quer na superfície da peça, quer ao longo da sua espessura. Este tipo de malha tem reservado todos os resultados em qualquer ponto da peça. Geralmente é usada para um estudo pormenorizado do que se passa no



interior da peça e como é que isso vai influenciar a superfície da mesma, fazendo assim a malha mais próxima da realidade.

Para melhor entendimento, será apresentado os passos descritivos necessários para uma análise no Moldflow.

### 3.1.1 Malha

O método dos elementos finitos consiste na subdivisão da geometria em pequenas partes a qual se dá o nome de elementos. Estes elementos finitos são ligados entre si por pontos, os quais se denominam, nós. A Figura 22 ilustra a constituição de uma malha:

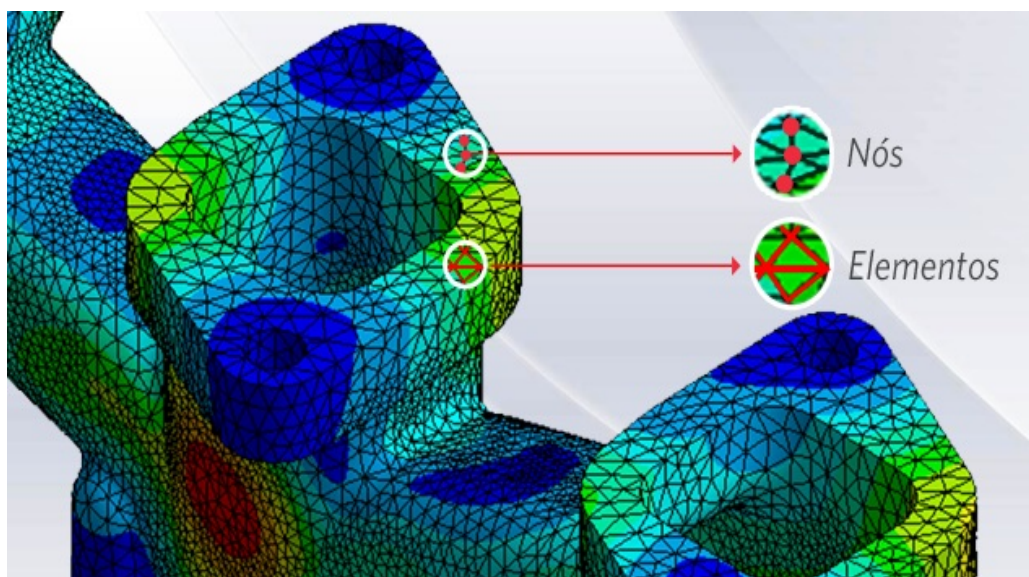


Figura 22 - Exemplo dos constituintes de uma malha,[25]

Ao conjunto de todos estes itens, elementos e nós, dá-se o nome de malha. A malha é um dos aspetos mais importantes numa simulação, pois as equações matemáticas que regem os comportamentos físicos envolvidos no processo não são resolvidas de forma exata, mas sim aproximada. Isto leva-nos a concluir que quando mais refinada for a malha, melhores serão os resultados da simulação. Deste modo, para a mesma geometria, utilizando elementos mais pequenos resultará de um número maior de nós, ou seja, uma malha refinada com erros de cálculo muito pequenos. Por outro lado, se utilizarmos elementos de maiores dimensões, esta geometria apresentará um menor número de nós. Neste último caso, denomina-se por malha grosseira, onde os erros de cálculo já poderão ser significativos.

O software Moldflow já tem a capacidade de apresentar uma malha de forma automática onde o utilizador apenas especifica maior distância possível entre nós, o que permite refinar mais ou menos a malha.

Após o processo de malhagem automática, existem alguns parâmetros a qual é de extrema importância verificar/corrigir para que estes fiquem dentro dos conformes.



Para este requerimento é necessário analisar a malha e descobrir quais os elementos com uma proporção elevada entre o comprimento e a altura, como ilustrado na Figura 23. Esta medida deve ser inferior a 3:1 em média e no máximo 20:1 no caso das malhas midplane e dual domain. No caso das malhas em 3D poderá ascender até ao rácio 30:1.

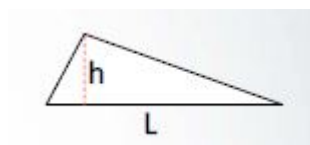


Figura 23 – Proporção do comprimento pela altura do elemento

Na Figura 24 seguintes estão ilustrados dois exemplos sobre como identificar e corrigir as elevadas proporções:

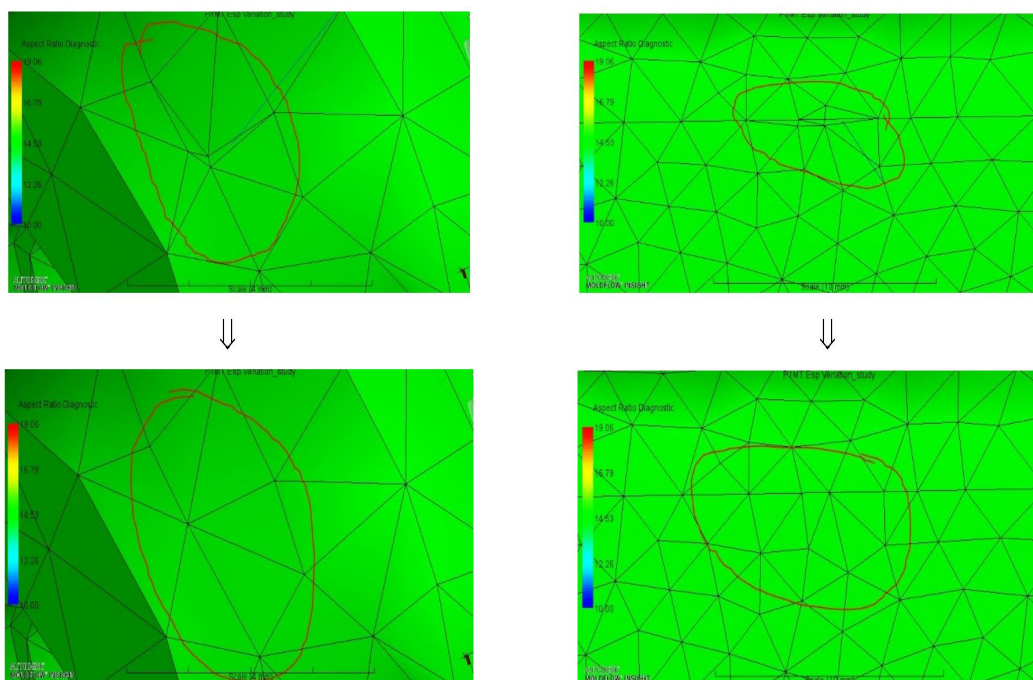
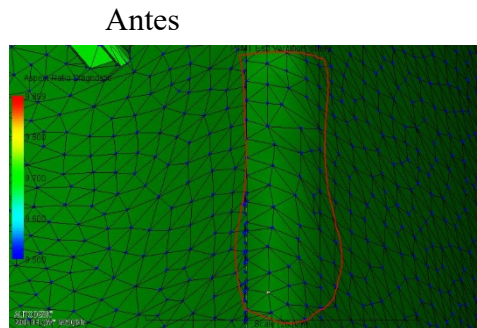
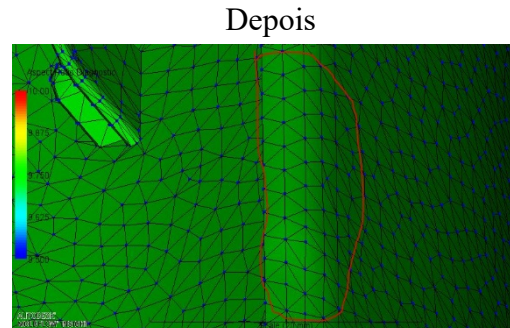


Figura 24 - Correção das proporções elevadas

Outra parte importante para obter resultados fidedignos é o alinhamento e homogeneização da malha dentro do possível. Muitas vezes existe desalinhamentos dos elementos devido a curvaturas não constantes presentes no CAD, onde é necessário atuar de acordo com o exemplo ilustrado na Figura 25 e na Figura 26:



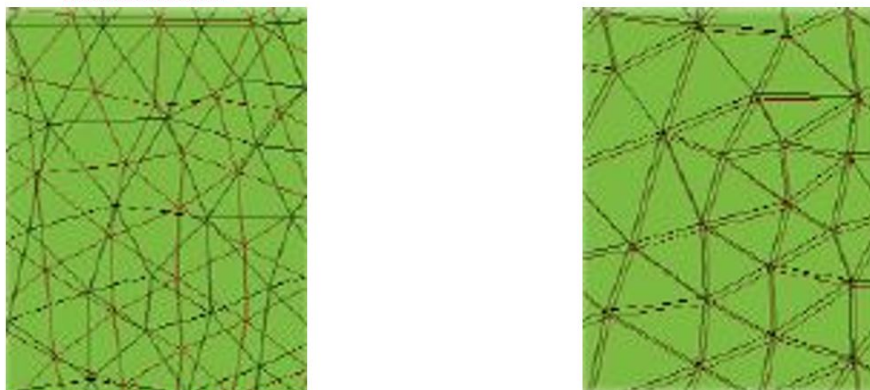
*Figura 25 - Alinhamentos dos elementos, Antes*



*Figura 26 - Alinhamento dos elementos, Depois*

Tendo a proporção dos elementos corrigida, assim como o alinhamento dos mesmos, é então necessário conferir se a malha está alinhada com a parede paralela que perfaz a espessura da peça, isto é, não ter desfasamento nos elementos da superfície diretamente paralela. Esta propriedade apenas é usada na malha Dual Domain, pois é a única que representa apenas as superfícies da peça.

Na Figura 27 são apresentadas as diferenças entre uma malha concordante (direita) e a não concordante (esquerda). Geralmente, a concordância das malhas tem que apresentar um valor superior 90% de concordância para a obtenção de resultados fiáveis.



*Figura 27 - Exemplo de uma malha não concordante (esquerda); malha concordante (direita)*

## 3.2 Instrumentação

A medição de rechupes é feita com auxílio de um medidor de brilho. O rechupe, apresenta uma concavidade na peça, pelo que a luz não será refletida na totalidade, havendo uma dispersão de luz refletida na zona dos rechupes, o que afeta pontualmente o brilho da peça.

O medidor de brilho é constituído na sua essência por uma lente emissora e outra lente recetora (Figura 28), onde a medição do brilho é feita pela diferença entre a luz emitida e a luz absorvida.



Figura 28 - Lentes do medidor de brilho

### 3.2.1 Calibração do medidor de brilho

Para a medição do brilho, é necessário calibrar o aparelho para o material a analisar, que neste caso são plásticos de médio brilho.

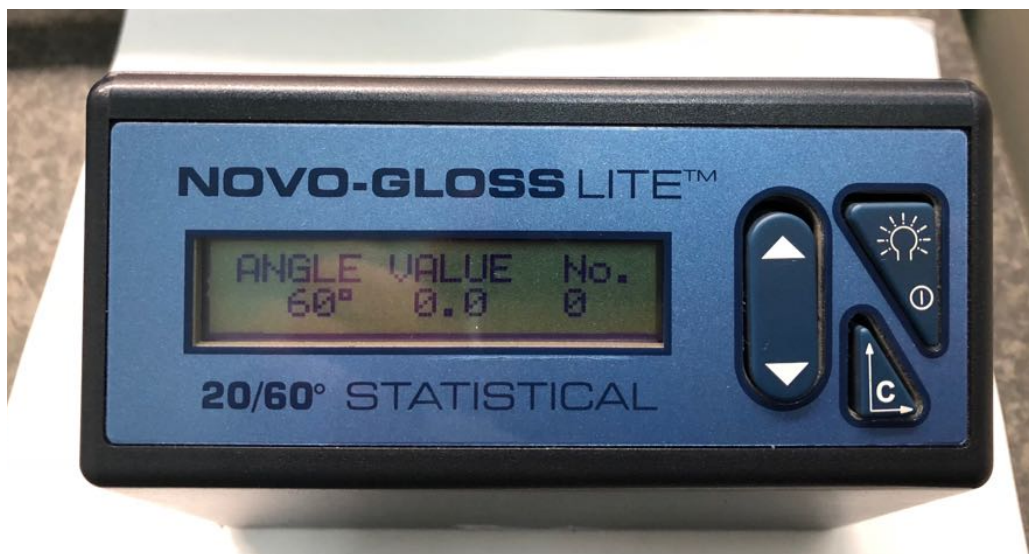
Tabela 1 - Tabela de ângulos normalizada para medição de brilho,[26]

Standard	20°	60°	85°	45°	75°
	High Gloss	Medium Gloss	Low Gloss	Medium Gloss	Low Gloss
	Coatings, plastics and related materials			Ceramics	Paper

Pela Tabela 1, o ângulo para a medição de plásticos de médio brilho, é de 60°.

Por este motivo, inicia-se a calibração pela definição do ângulo de 60°, como ilustrado na Figura 29.





*Figura 29 - Definição do ângulo de 60°*

Após a definição do ângulo das lentes, é necessário dar valores de referência à máquina, onde os extremos são a reflexão total e a não reflexão. Para isso, existe um calibrador com duas superfícies. Uma das superfícies é totalmente espelhada sendo a outro o total oposto.



*Figura 30 - Calibrador da reflexão*

Após dar à máquina os valores de referência, onde a superfície inferior na Figura 30 é a totalmente espelhada, sendo a superior o inverso, é necessário confirmar a calibração.



Figura 31 - Confirmação da calibração

Após a calibração, coloca-se o aparelho sobre a superfície totalmente espelhada, em que neste caso (60°), temos que obter 92.4 GU (Gloss Unit). Foi obtido 92.8 GU, o que indica que o aparelho está calibrado corretamente (Figura 31).

### 3.3 Análise

Após o processo de malhagem da peça, é necessário construir os canais de injeção, onde o Moldflow indica quais são os pontos favoráveis para a injeção, sendo necessário o utilizador referir o número de pontos de injeção pretendido e ainda se existe áreas proibidas a qual não seja admitida marcas de injeção. O software utiliza o “Advanced Gate Locator Algorithm” em que o critério consiste da redução da resistência do fluxo do material para o interior do molde [14].

No caso de estudo, a peça não pode apresentar ataques na superfície visível ao cliente, pelo que a injeção apenas se pode situar na zona interior. Na Figura 32 está representado as localizações possíveis dos ataques, onde a azul está representado a zona mais favorável, seguindo gradualmente para a zona vermelha, menos favorável.

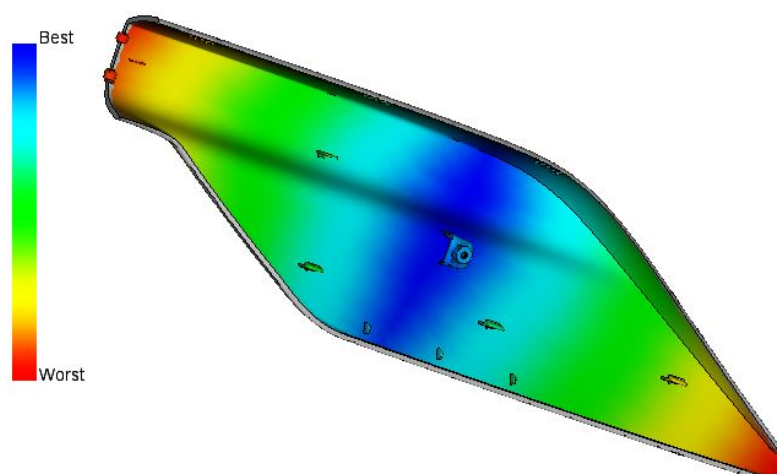


Figura 32 - Resultado da análise de localização do ataque

Contudo, a localização dos pontos de injeção não respeita, neste caso, a regra básica de boa prática do fluxo unidirecional, pelo que os ataques estarão em localizações diferentes das recomendadas pelo Moldflow.

### 3.3.1 Solução atual

Na Figura 33 temos representado a cavidade do molde utilizado para as peças em estudo. A representação de todas as peças é importante pois influencia os resultados no que diz respeito à quantidade de peças que serão fabricadas por injeção. A azul temos representado as peças traseiras, a amarelo está representado as peças adicionadas ao molde (frontais), a verde os canais frios e a vermelho os canais quentes. Isto significa que a cada ciclo de injeção os canais frios saem juntamente com as peças, sendo removidos posteriormente. Estes canais apresentam uma forma em “U” com 8mm de altura e 8mm de diâmetro. Os canais quentes apresentam todos uma secção circular de 12mm de diâmetro constante, em que na junção aos canais frios existem válvulas que permitem o controlo da sua abertura.

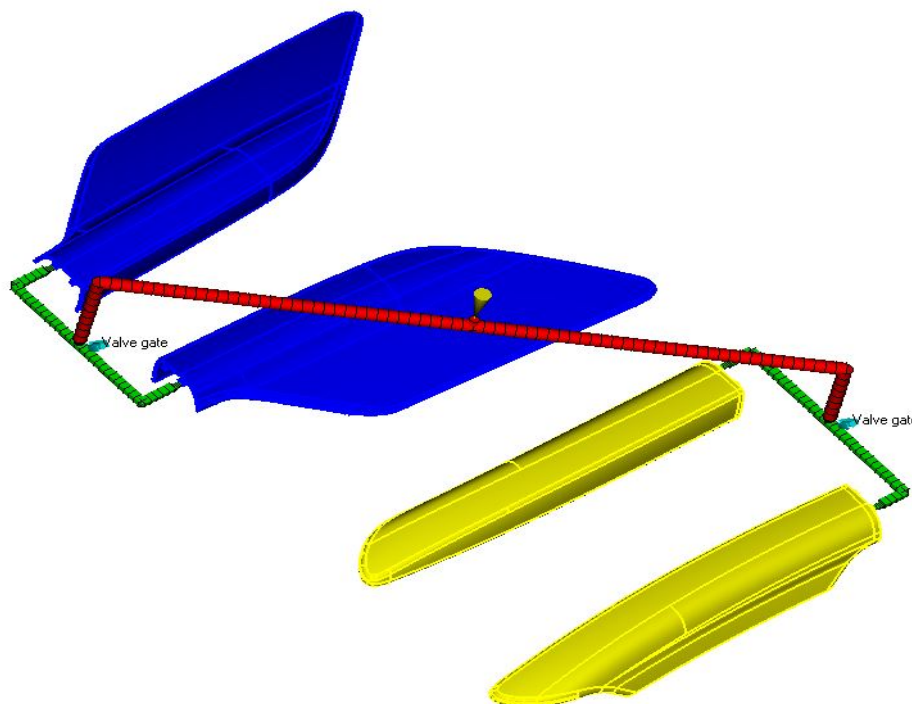


Figura 33 - Solução atual em produção

O gate 1, ilustrado na Figura 34, apresenta uma forma retangular afunilada, com as dimensões na extremidade inicial de 6.3mmX2.5mm e na final de 4mmX2mm.

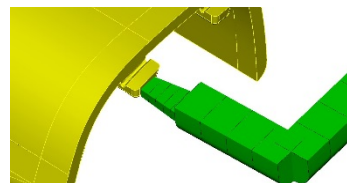


Figura 34 - Gate 1 da solução atual

O gate 2, ilustrado na Figura 35, apresenta uma forma retangular afunilada, com as dimensões na extremidade inicial de 6.8mmX3.5mm e na final de 4mmX2mm.

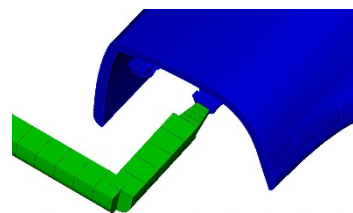


Figura 35 - Gate 2 da solução atual

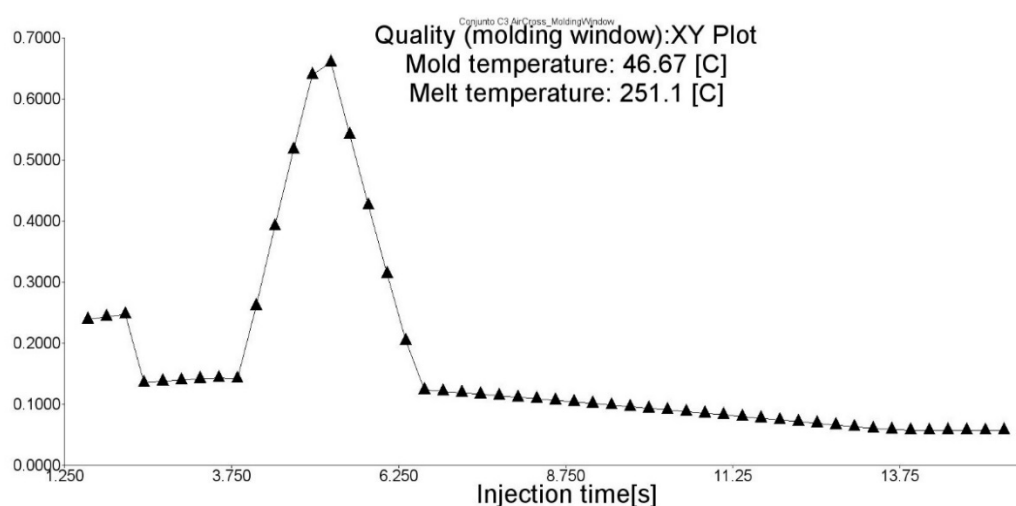
### 3.3.2 Análise preliminar

A Janela de Moldação é uma análise necessária para a primeira abordagem no início de qualquer projeto, pois define quais serão os intervalos dos valores dos parâmetros de injeção. Esta análise apenas devolve ao utilizador recomendações de valores para a temperatura do fundido, temperatura do molde e tempo de injeção, permitindo ao utilizador fixar um parâmetro e obter a variação dos outros. Para este tipo de análise, é necessário conhecer o material a utilizar a fim de seguir as recomendações do fornecedor da matéria prima.

Para o problema da tese, o fornecedor indica uma temperatura de molde de 45°C e de fundido 250°C, pelo que estes parâmetros serão os fixados, pois variando-os, podemos alterar o comportamento do material fazendo com que se degrade ou apresente baixa qualidade final depois de moldado. Assim é recomendado deixar estes parâmetros corresponderem ao recomendado pelo fornecedor, variando apenas o parâmetro de processo, tempo de injeção.

Esta análise permite-nos também obter um indicador da qualidade final preliminar da nossa peça, isto é, uma combinação dos parâmetros temperatura frente quente do fundido, pressão de injeção, velocidade de distorção, tensão de corte e tempo de arrefecimento, que são os pontos de partida para uma análise mais detalhada.

Por exemplo, na Figura 36 temos a indicação do tempo de injeção em função da qualidade final da peça.



Nesta pré-análise denominada de zona de manuseamento podemos também obter dados relativos às temperaturas com maior probabilidade de obter a peça final com qualidade. A análise apresenta-nos 3 cores: verde, amarelo e vermelho. O verde significa que temos uma boa probabilidade de obter a peça final com um bom índice de qualidade, a amarelo existe uma elevada probabilidade de obtermos a forma desejada, porém irá também ter presente os diversos problemas que reduzem a qualidade das peças injetadas. Por fim, a vermelho temos representada a zona onde não será possível alcançar a forma geométrica pretendida. Na Figura 37, indica-se este resultado, onde se mostra a zona adequada a verde.

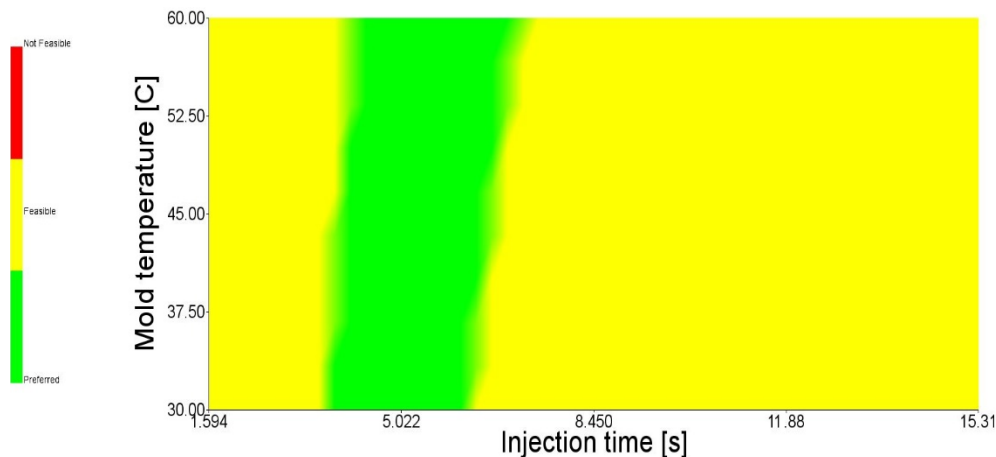


Figura 37 - Zona de manuseamento da solução atual

Mais uma vez, é de notar que para uma temperatura de fundido de 250°C e uma temperatura de molde de 45°C, o tempo de injeção ótimo será de aproximadamente 5 segundos.

O mesmo tipo de análise pode ser feito relativamente à pressão de injeção, como se mostra na Figura 38 e que permite prever a pressão máxima exercida no molde durante a injeção. Caso se verifique que este parâmetro é crítico, é possível alterar o tempo de injeção por forma a minimizar a pressão de injeção para valores mais adequados.

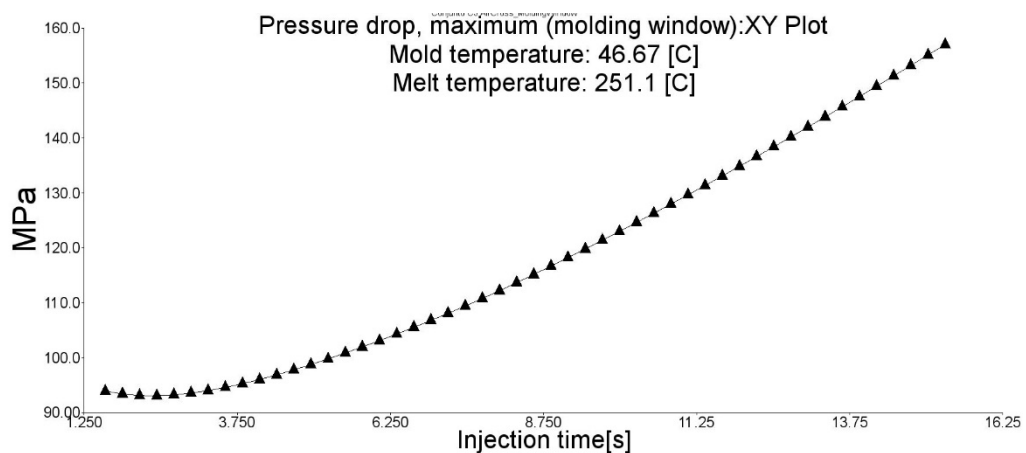


Figura 38 - Pressão de injeção vs Tempo de injeção para a solução atual



A temperatura da frente quente do fundido, ilustrado na Figura 39, é um resultado de extrema importância, sendo o seu controle imprescindível, pois este ditará o aparecimento de queimados na peça, ou a solidificação da mesma antes do molde estar totalmente preenchido. Por outro lado, se a temperatura da frente chama diminuir, mas não o suficiente para solidificar, o plástico torna-se mais viscoso, o que leva a um aumento na pressão de injeção e há possibilidade de existir zonas para onde o material não escoou. Assim, as regras de boa prática no mundo da injeção de plástico, indicam que a temperatura da frente chama não deve subir mais que 2°C ou diminuir mais que 10°C, relativamente à temperatura do fundido.

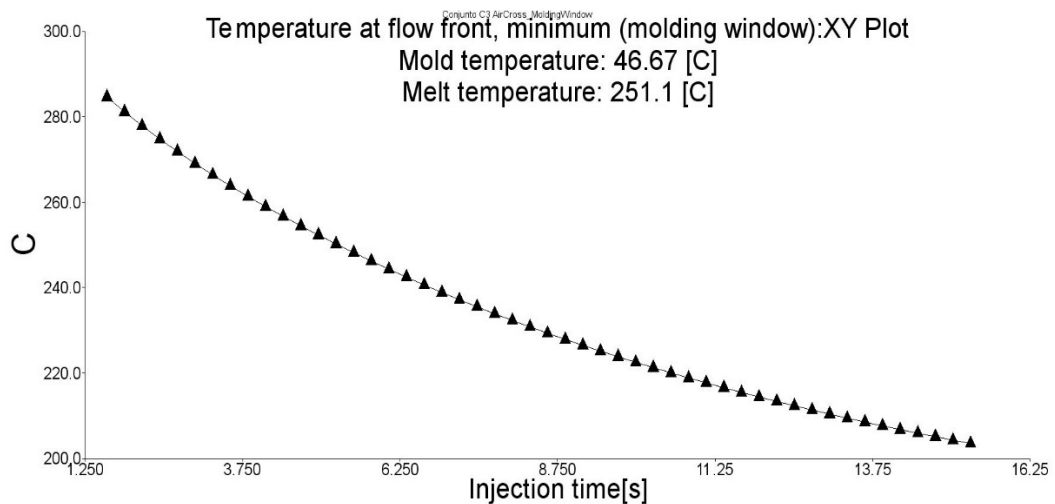


Figura 39 - Temperatura da frente chama para a solução atual

Nas condições propostas relativamente ao material utilizado para a solução atual, teremos uma temperatura de fundido de 250°C, pelo que, é importante manter essa temperatura ao longo do enchimento, o que nos leva à escolha de tempos de injeção que rodeia os 6 segundos.

A velocidade de distorção é um parâmetro que indica o quão rápido deslizam as camadas de plástico relativamente às suas sequentes. Este parâmetro tem uma elevada importância pois se a velocidade de distorção for demasiado elevada, podemos observar a degradação do material devido à quebra das cadeias poliméricas. O fornecedor do material apresenta um valor recomendado para a velocidade de distorção, o qual não deverá exceder em nada.

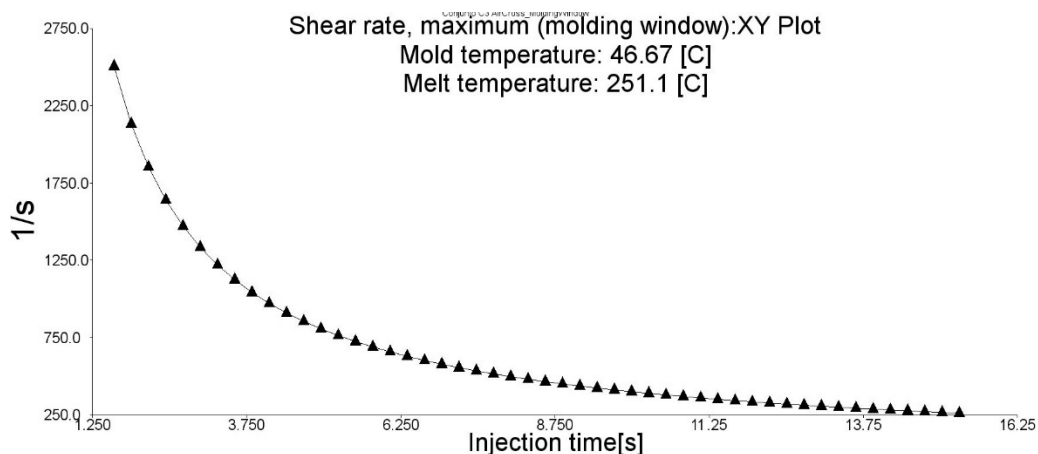


Figura 40 - Velocidade de distorção para a solução atual

Com este resultado é difícil dizer qual seria o tempo de injeção ideal para o enchimento da peça, mas é possível comprovar se o tempo escolhido produz um valor de velocidade de distorção menor do que o recomendado ( $50000 \text{ s}^{-1}$ ).

Por último, a tensão de corte do material é novamente um parâmetro importante na produção de peças por injeção, porém os parâmetros de injeção não variam em muito esta tensão. Este parâmetro é um dos responsáveis pelas tensões residuais presentes na peça e consequentemente pelos empenos da mesma.

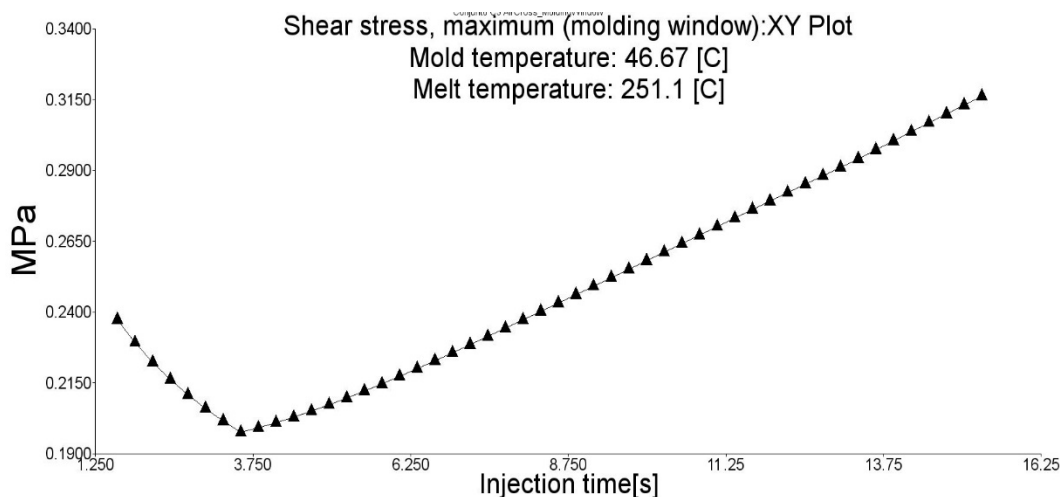


Figura 41 - Tensão de corte para a solução atual

Apesar da tensão de corte não ser muito afetada pelo tempo de injeção, se for possível reduzi-la, é sempre uma vantagem adicional. Denota-se, pela Figura 41, que o tempo de injeção preferencial será aproximadamente 4 segundos, sendo que um tempo de injeção inferior iria causar delaminação do fundido durante o seu escoamento enquanto tempos superiores iriam resultar em arrefecimentos antes do enchimento estar completo com a consequência de obter uma maior viscosidade que resultará de uma maior pressão superior para o enchimento, aumentando a taxa de corte.

Feita a análise da janela de moldação, é possível concluir que os parâmetros ótimos para o enchimento das peças serão então:

- ⇒ Temperatura do molde: 45°C
- ⇒ Temperatura do fundido: 250°C
- ⇒ Tempo de injeção: aproximadamente 6s

### 3.3.3 Resultados para a solução atual

Seguindo os parâmetros fornecidos pela empresa, que são os atualmente usados em produção, as peças foram injetadas num tempo de 7 segundos, e com o “switch-over” a 99% do enchimento total. A pressão de compactação é de 85MPa e com a duração de 12 segundos. O tempo de arrefecimento da peça são 20 segundos.

#### a) Pressão de injeção

Ao analisar os resultados da simulação é perceptível que teremos problemas com a capacidade da máquina de injeção para encher o molde no tempo previsto, pois a pressão da injeção ultrapassa os 100MPa, como ilustra a Figura 42.

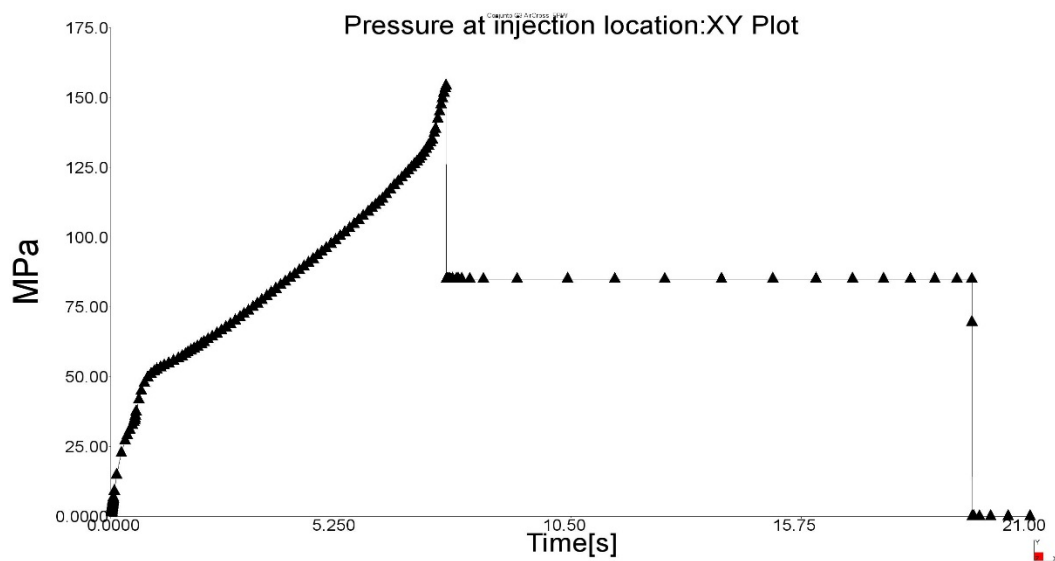
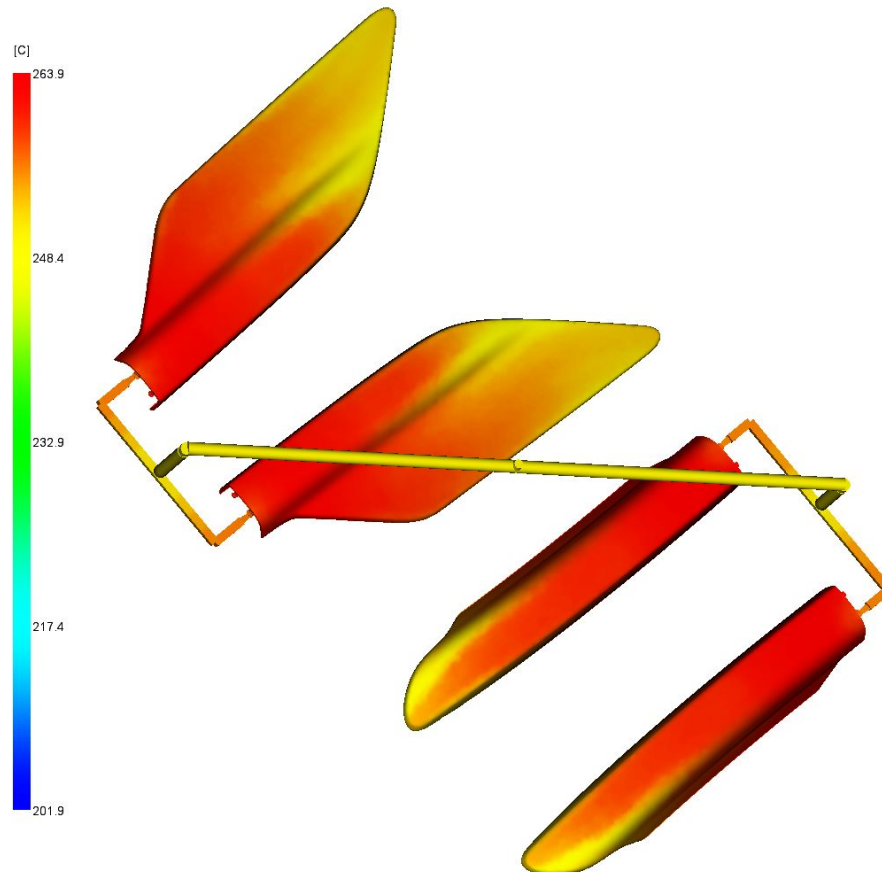


Figura 42 - Pressão de injeção para a solução atual

Como a pressão de injeção chega a valores de 155MPa, quaisquer pequenos ajustes que sejam possíveis de fazer não iram ter um grande impacto nestes valores de pressão, pelo que é necessário redefinir as condições de injeção.

#### b) Temperatura da frente quente do fundido

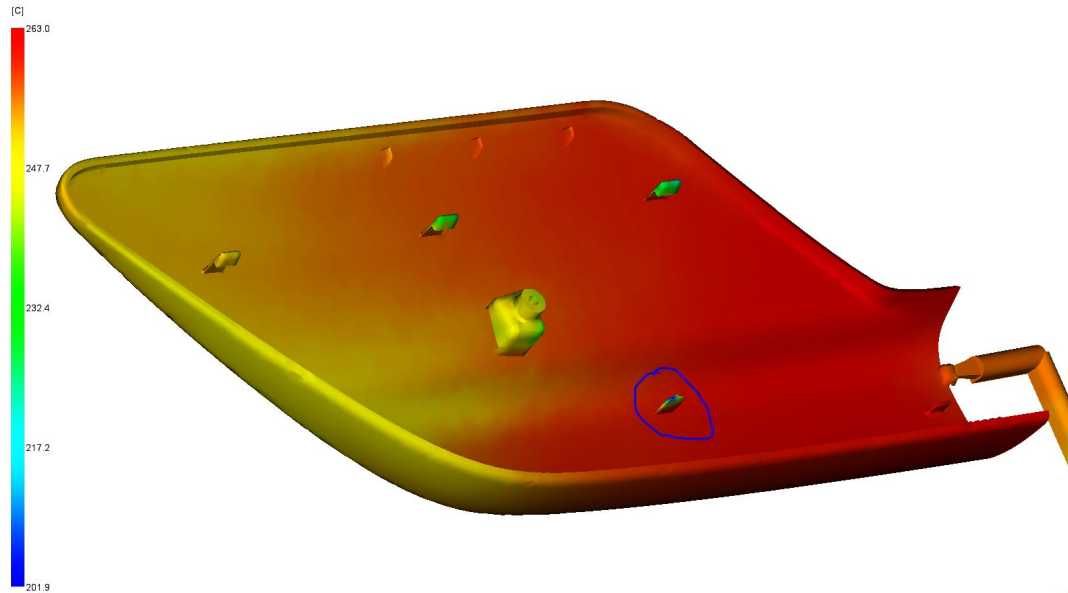
Ao analisar este resultado, deparamo-nos com um problema, pois a sua escala tem uma grande abrangência de valores (201.9°C a 263.9°C), em que o ideal seria uma escala de valores mais reduzida (240°C a 252°C).



*Figura 43 - Resultado da temperatura da frente quente do fundido para a solução atual*

Na Figura 43, conseguimos visualizar que à saída dos ataques a temperatura sofre um elevado aumento devido à restrição dos mesmos, o que poderia ser facilmente controlado pela adição de um canal de refrigeração situado após os ataques de forma a controlar a temperatura da frente chama e não exceder os 252°C, preferencialmente.

Porém, na Figura 44, é possível reparar que existe uma descida brusca da temperatura da frente chama (na área interna do círculo azul), o que faz com que a adição de canais de refrigeração com o intuito de controlo da temperatura de frente chama seja impossível, pois haveria um congelamento precoce e os reforços das peças não seriam preenchidos.



*Figura 44 - Temperatura da frente chama na traseira da peça para a solução atual*

c) Pressão no final do enchimento

Na análise da Figura 45 é possível concluir que o molde ficará totalmente preenchido com o fundido, pois a pressão mais baixa no fim do enchimento é de 8MPa. Por outro lado, é possível entender as elevadas pressões de injeção pois o enchimento não é balanceado, o que indica um enchimento das peças mais pequenas, muito rápido e por sua vez ficam a pressurizar o bico de injeção até o enchimento das peças maiores estar concluído.

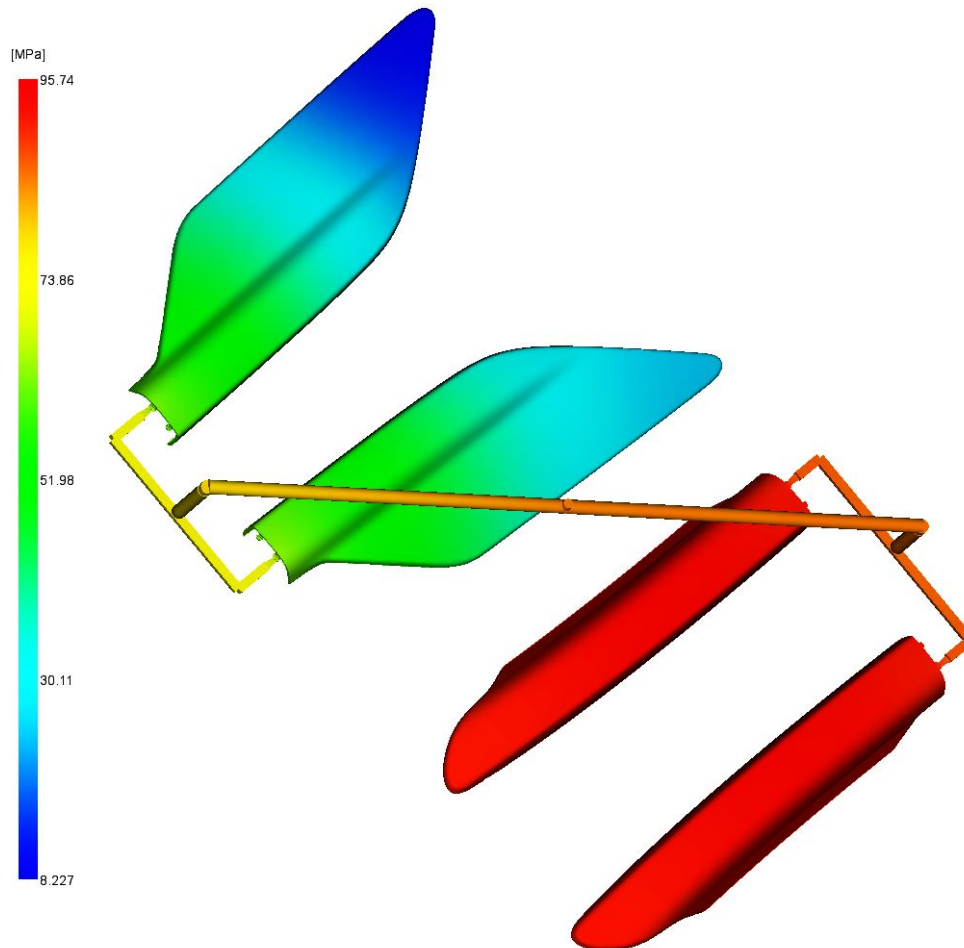


Figura 45 - Pressão no final enchimento para a solução atual

d) Velocidade de distorção

No caso da velocidade de distorção (Figura 46), esta não apresentará um problema nestas condições de enchimento devido ao elevado tempo de injeção. Ainda assim, foi feito um corte no ataque da peça (onde a velocidade de distorção é maior) que indica que o ataque é demasiado restrito.

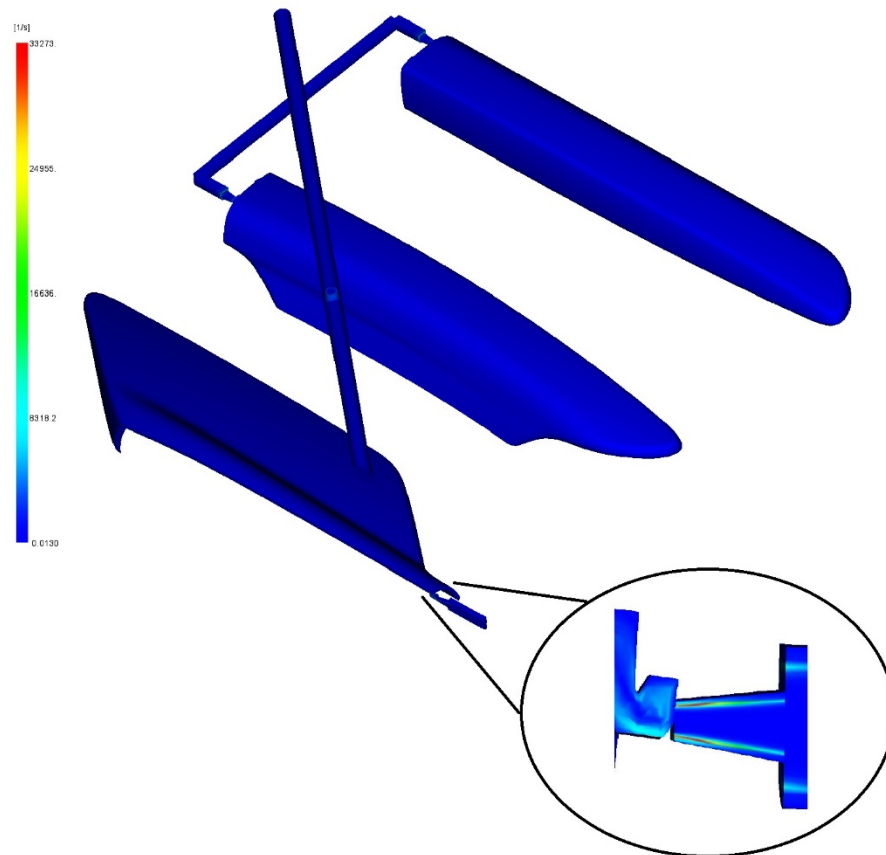
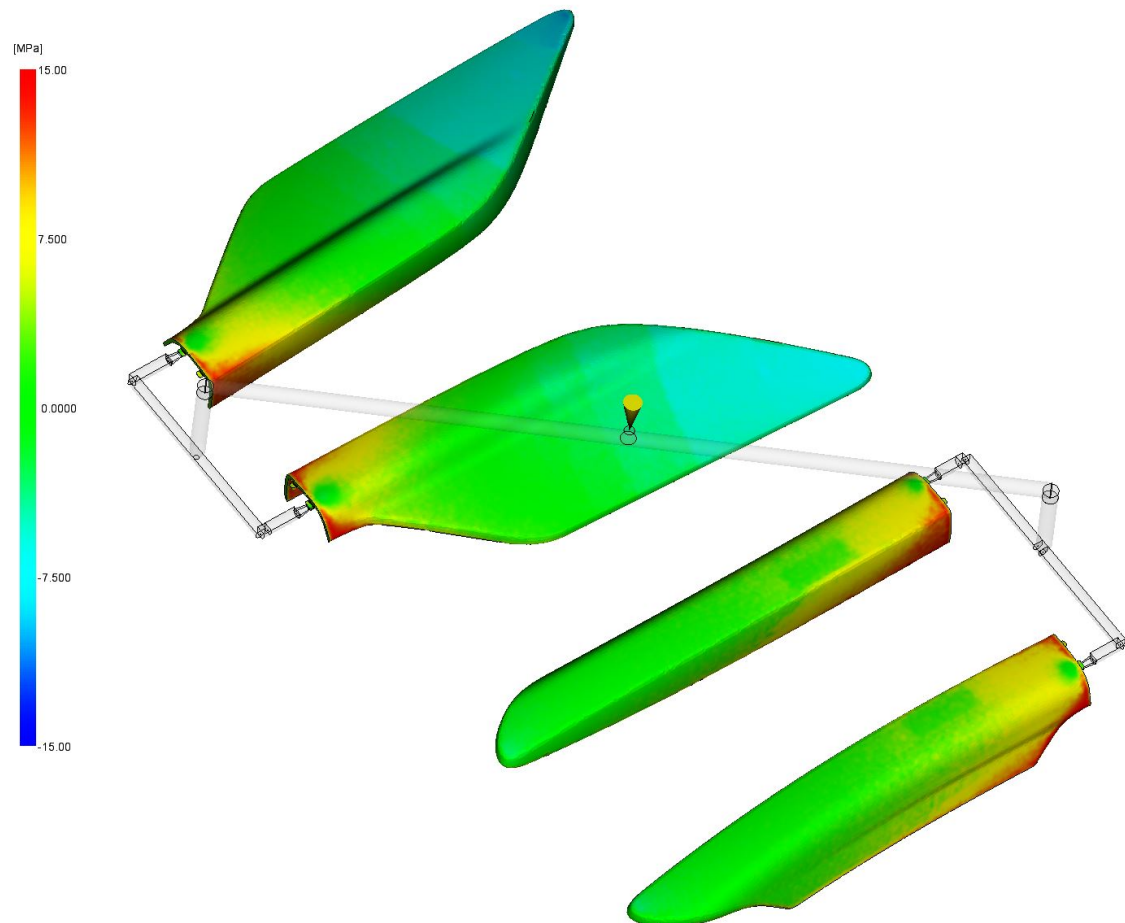


Figura 46 - Velocidade de distorção para a solução atual

e) Tensões residuais

No caso das tensões residuais, ilustrado na Figura 47, devido a termos apenas um ataque na extremidade da peça a encher, a pressão de compactação é menos eficiente, causando um maior empeno e consequentemente, aumentando a tensão superficial.



*Figura 47 - Tensões residuais para a solução atual*



### 3.3.4 Solução Cashew

Na Figura 48 está ilustrada a solução proposta pela empresa, visa a redução de todos os problemas envolvidos com a solução anterior, pelo que será apresentado um estudo sobre o caso de implementação da solução.

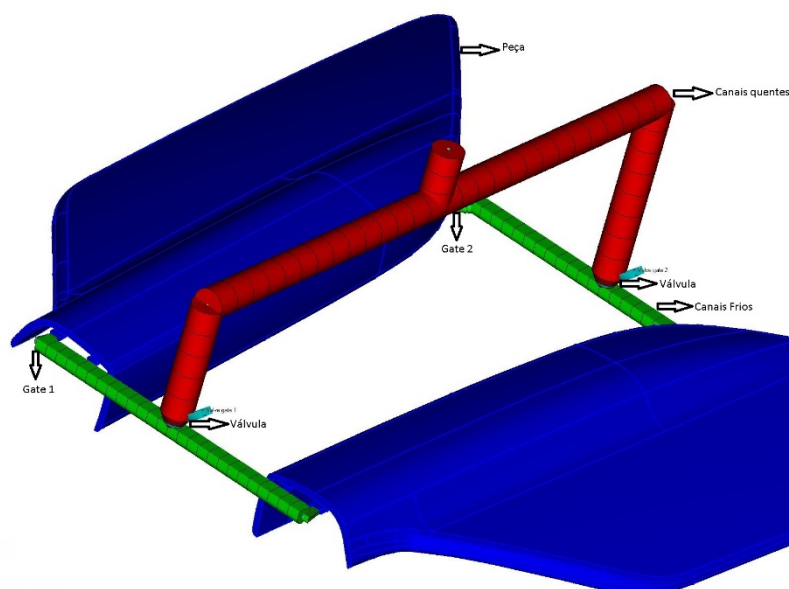


Figura 48 - Solução "Cashew" proposta pela empresa

A azul está representado as peças a encher, a verde os canais frios e a vermelho os canais quentes. As dimensões dos canais frios são iguais à da solução atual, porém os canais quentes têm 16mm de diâmetro.

O gate 1, ilustrado na Figura 49, apresenta uma forma retangular afunilada, com as dimensões na extremidade inicial de 6.8mmX3.5mm e na final de 4mmX2mm.

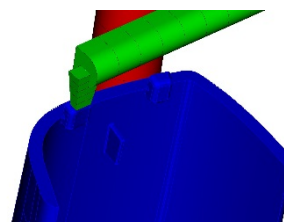


Figura 49 - Gate 1 da solução "Cashew"

O gate 2, ilustrado na Figura 50, é chamado frequentemente por "Cashew" em que as suas dimensões começam com 8mm afunilando para 2mm.

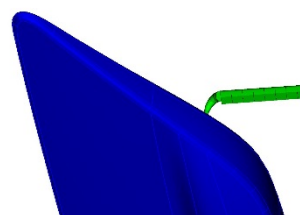


Figura 50 - Gate 2 da solução "Cashew"

### 3.3.5 Análise preliminar

Tal como na solução anterior, vamos proceder inicialmente à análise da janela de moldação.

Na Figura 51 está representado a janela de qualidade da solução “cashew”:

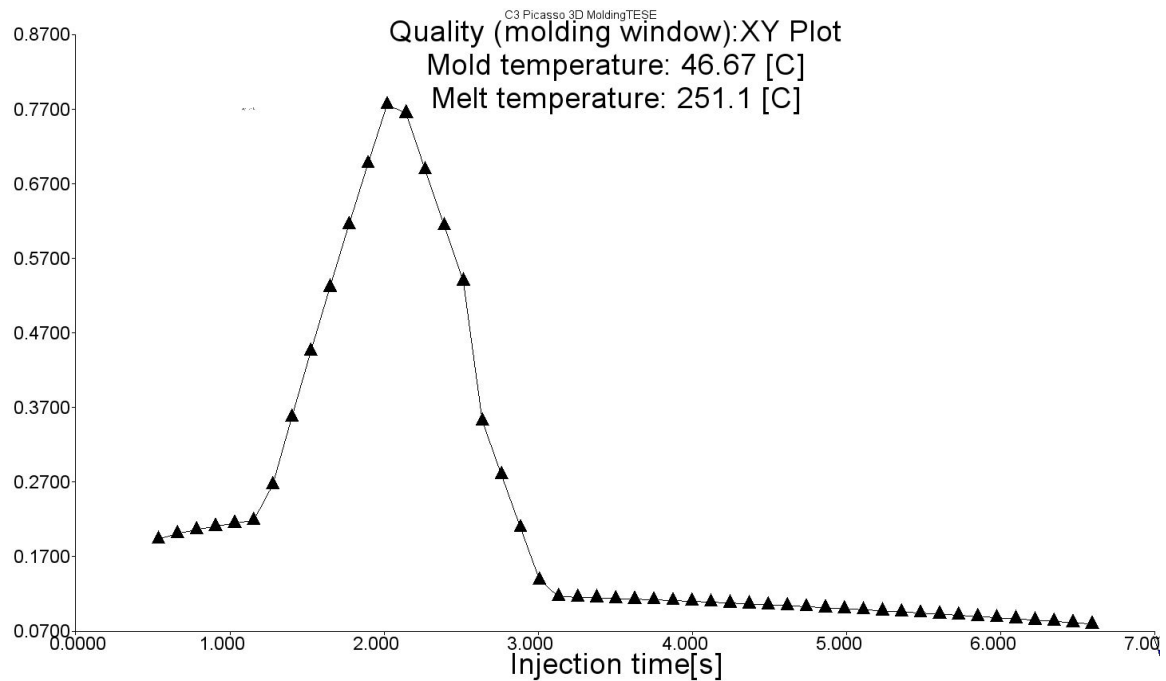


Figura 51 - Janela de qualidade da solução "Cashew"

Pela a figura acima, podemos então verificar que o maior índice de qualidade para a peça será com um tempo de injeção por volta dos 2 segundos.

Na Figura 52 está representado a zona de manuseamento da solução “cashew”:

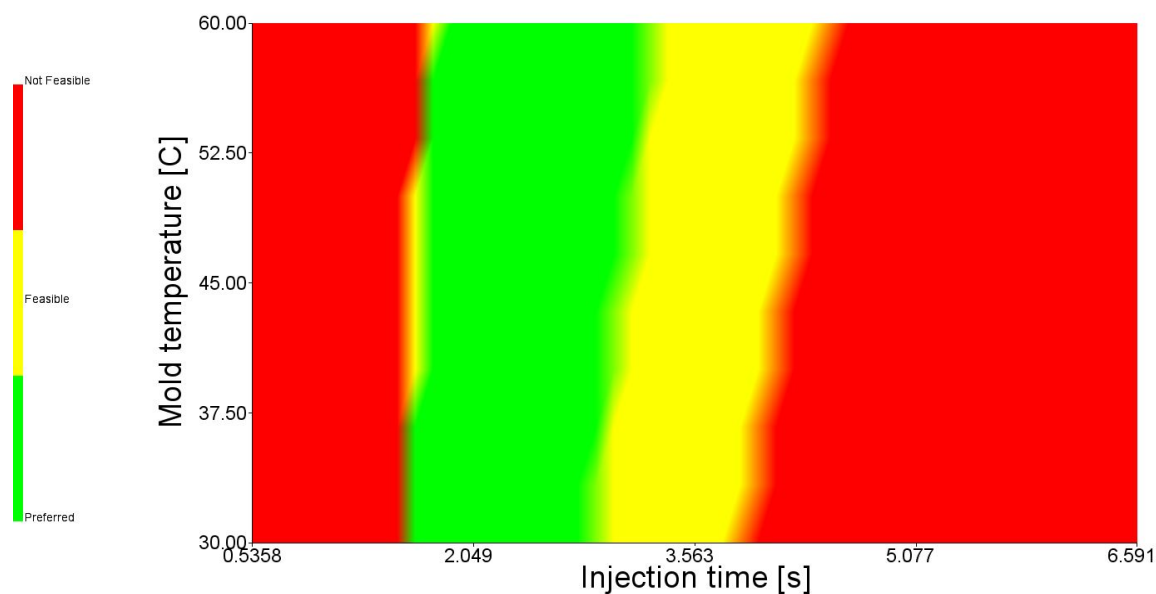


Figura 52 - Zona de manuseamento da solução "Cashew"

Mais uma vez, é de notar que para uma temperatura de fundido de 250°C e uma temperatura de molde de 45°C, o tempo de injeção ótimo será de aproximadamente 2 segundos.

Na Figura 53 está representado a pressão de injeção da solução “cashew”:

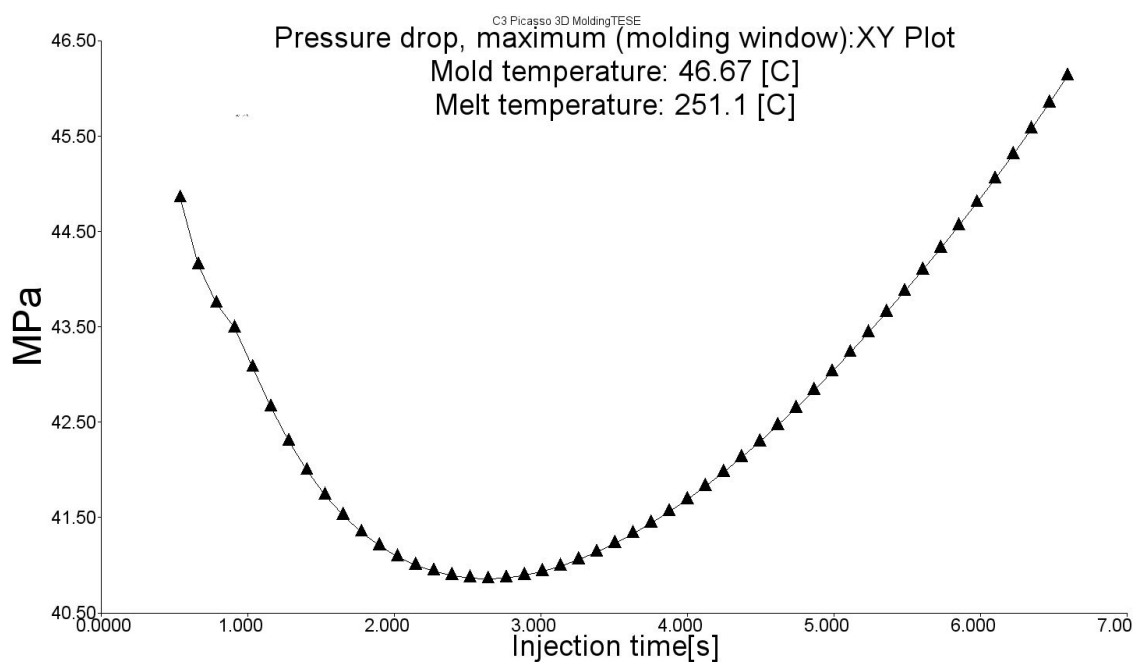


Figura 53 - Pressão de injeção vs Tempo de injeção para a solução "Cashew"

A minimização deste parâmetro dá-se no tempo de injeção entre os 2 e os 3 segundos, o que nos indica que, face aos gráficos anteriores, o intervalo de valores perto dos 2 segundos do tempo de injeção será o mais indicado para este projeto.

A Figura 54 ilustra a temperatura da frente quente do fundido da solução “cashew”:

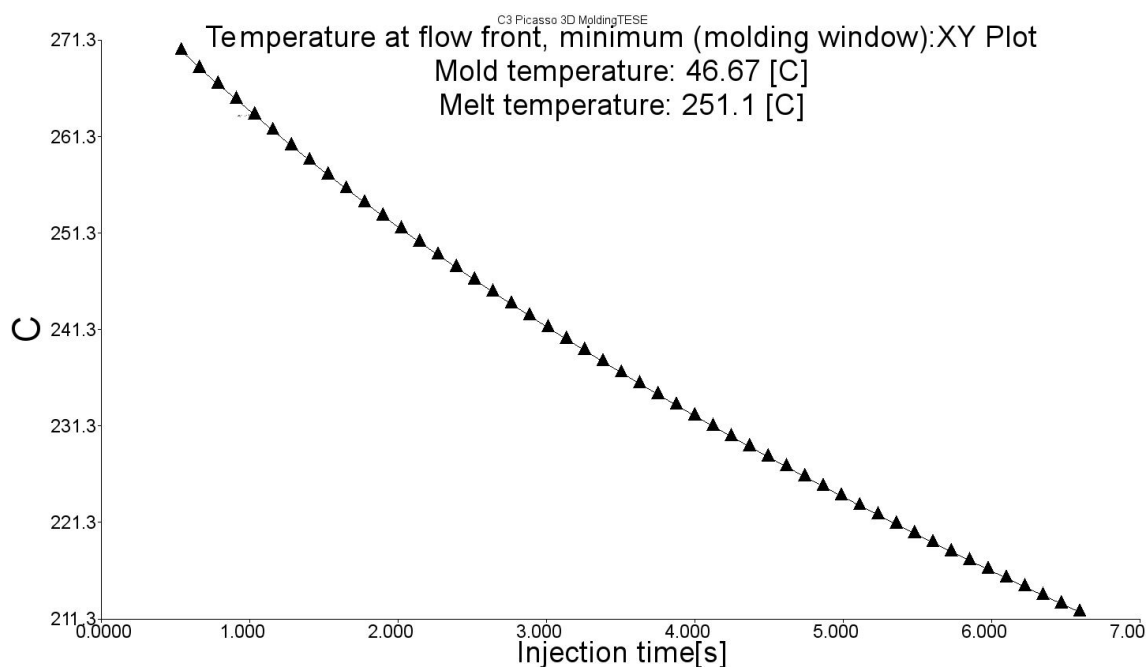


Figura 54 - Temperatura da Frente quente do fundido vs Tempo de Injeção para a solução "Cashew"

Para manter este parâmetro dentro do espectável, temos novamente um tempo de injeção que ronda os 2 segundos e meio.

Na Figura 55 está ilustrado a Velocidade de distorção da solução “cashew”:

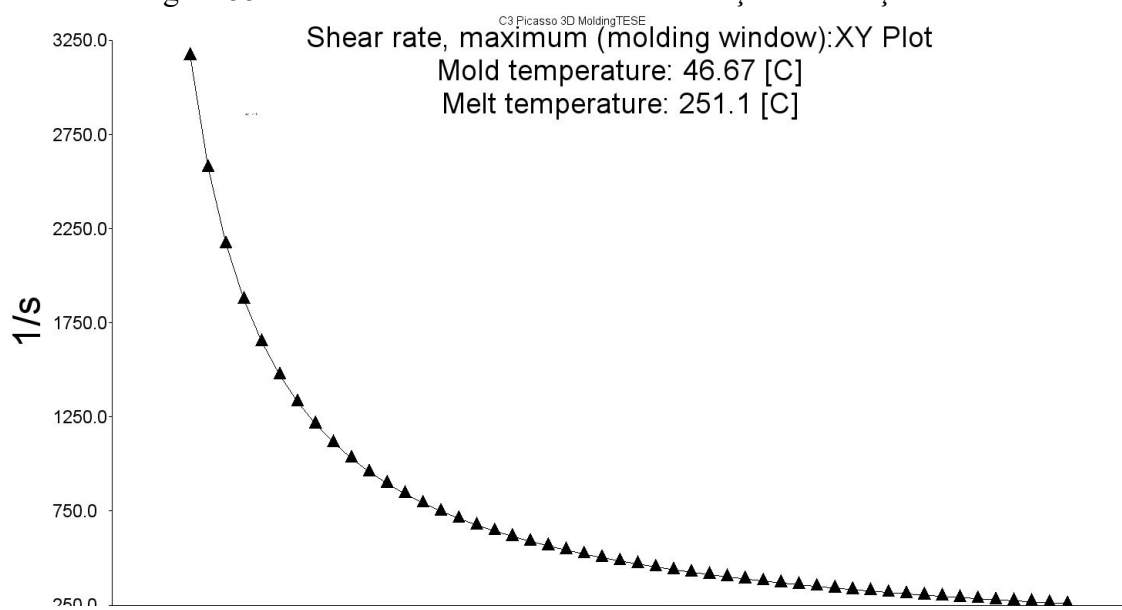


Figura 55 - Velocidade de distorção para a solução "Cashew"

Com este resultado é possível prever que não irá existir degradação do material dentro do molde pois a velocidade de distorção é inferior a  $50000 \text{ s}^{-1}$ .

Na Figura 56 está ilustrado a tensão de corte da solução “cashew”:

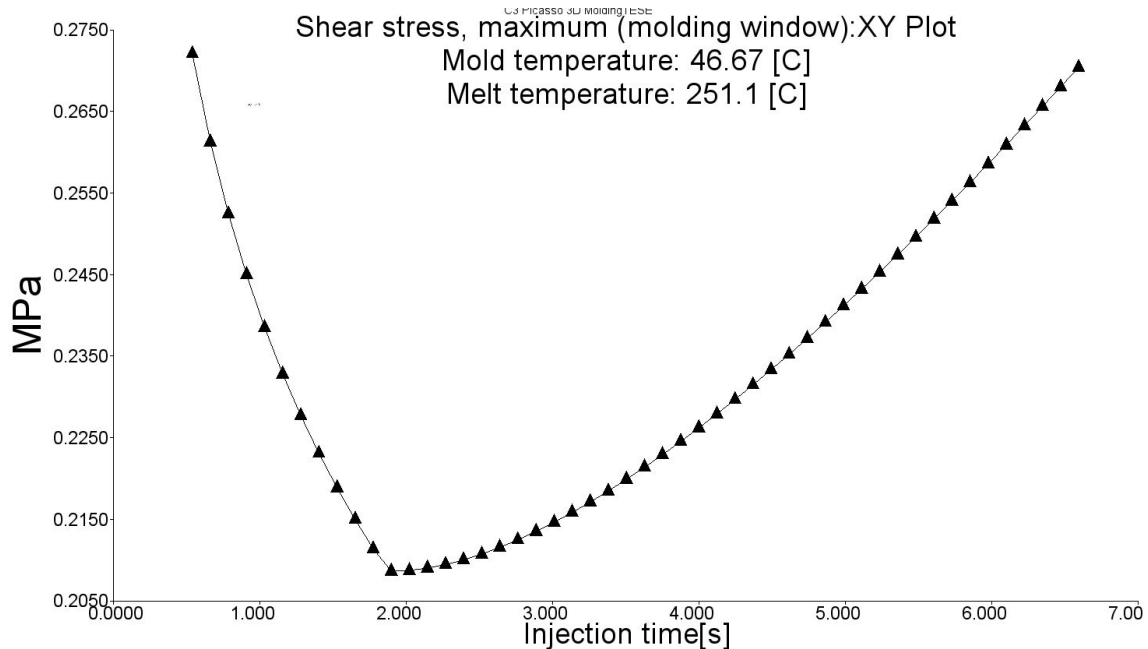


Figura 56 - Tensão de corte para a solução "Cashew"

Mais uma vez denota-se que o tempo de injeção preferencial será aproximadamente 2 segundos.

Feita a análise da janela de moldação, é possível concluir que os parâmetros ótimos para o enchimento da peça serão então:

- ⇒ Temperatura do molde: 45°C
- ⇒ Temperatura do fundido: 250°C
- ⇒ Tempo de injeção: aproximadamente 2s

### 3.3.6 Resultados da solução “Cashew”

Seguindo o recomendado pelo software Moldflow, as peças foram injetadas num tempo de 2.742 segundos, e com o “switch-over” a 95% do enchimento total. É essencial entender que o software propõe um enchimento onde a pressão de injeção seja mínima, sendo que os outros parâmetros não são tidos em grande conta, cabendo ao utilizador analisar os resultados e propor outro cenário, fazendo assim várias iterações até chegar à melhor solução possível consoante as restrições do projeto.

#### a) Pressão de Injeção

Ao analisar os resultados da simulação ilustrados na Figura 57 é visível que teremos problemas com a capacidade da máquina de injeção para encher o molde no tempo previsto, pois a pressão da injeção ultrapassa os 100MPa.

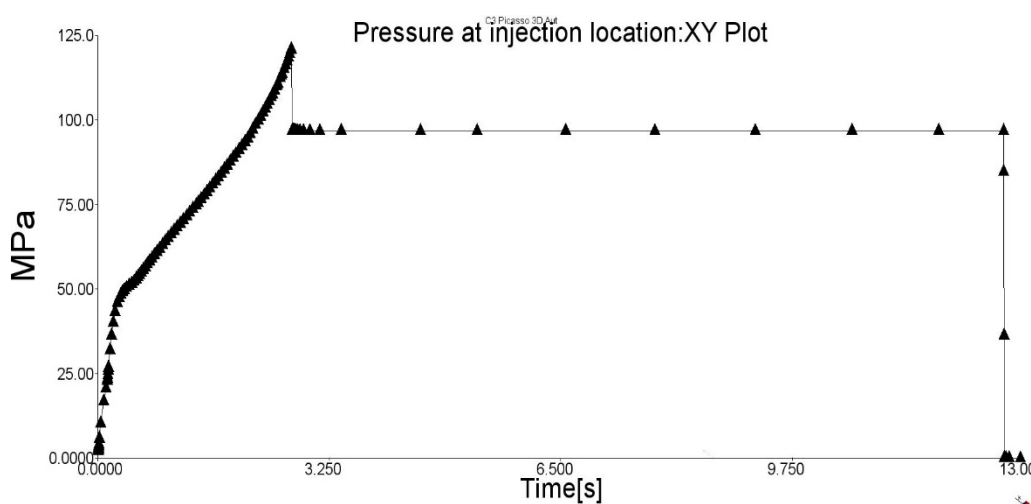


Figura 57 - Pressão de injeção para a solução "Cashew"

Como referido anteriormente, o software calcula o tempo de injeção para a pressão de injeção mínima, ou seja, esta pressão já seria a otimizada. Como estamos perto dos 100MPa, poderia ser suficiente um pequeno ajuste no “switch-over” para a comutação ser feita com menor percentagem de enchimento fazendo com que a máquina estagnasse nos 100MPa e o restante enchimento fosse sempre a essa pressão, porém, o tempo de injeção iria aumentar e poderia existir solidificação do plástico antes do enchimento estar completo.

Este resultado indica-nos logo que os canais de injeção são muito restritos para um enchimento de boa qualidade, pois não existe caudal suficiente para encher a peça rapidamente sem uma pressão elevada no bico de injeção.

b) Temperatura frente quente do fundido

O resultado dado pelo Moldflow no presente cenário não é novamente agradável.

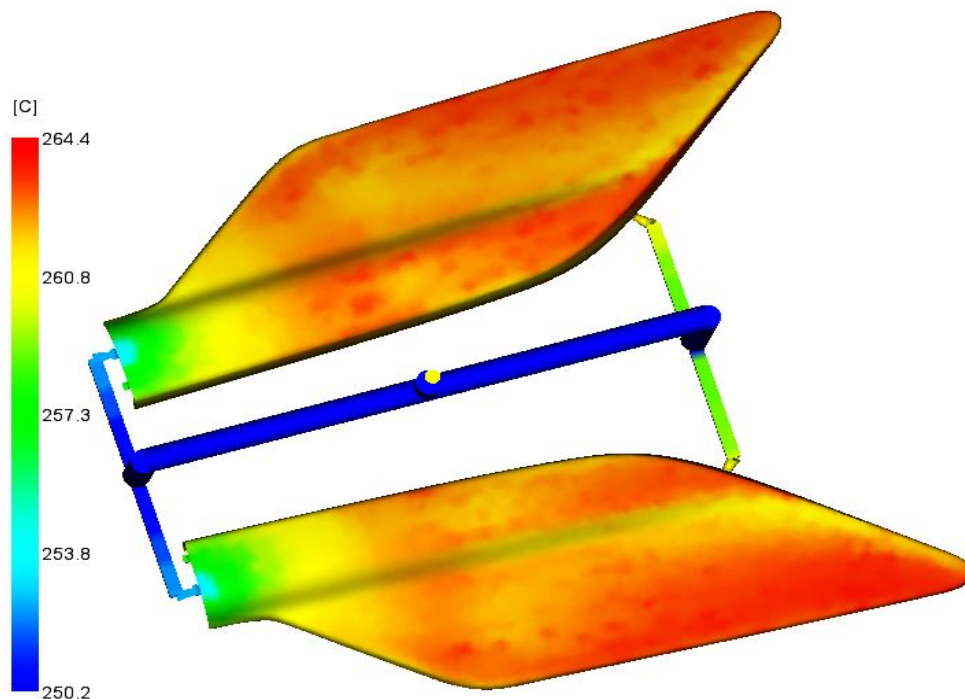
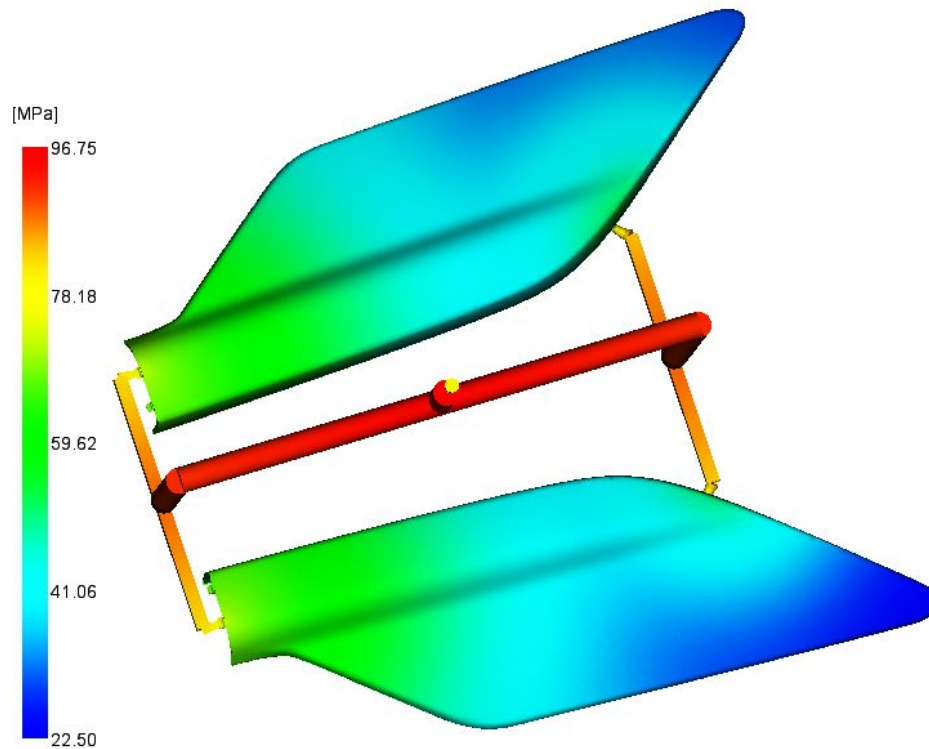


Figura 58 - Temperatura da frente quente do fundido para a solução "Cashew"

É possível ver na Figura 58 que logo na saída dos primeiros ataques (situados à esquerda), a temperatura do fundido começa a subir para valores fora do recomendado, novamente devido a uma elevada restrição. O fluído começa a ser demasiado pressionado o que faz com que a sua temperatura aumente conferindo assim uma menor viscosidade e consequentemente uma maior fluidez, porém causa degradação do mesmo.

c) Pressão no final do enchimento

Este resultado ilustrado na Figura 59 é de extrema importância pois permite ao utilizador perceber se o molde irá encher totalmente ou não, bastando para isso a pressão mínima dentro do molde ser superior a zero, porém este valor não convém ser muito próximo do valor neutro.



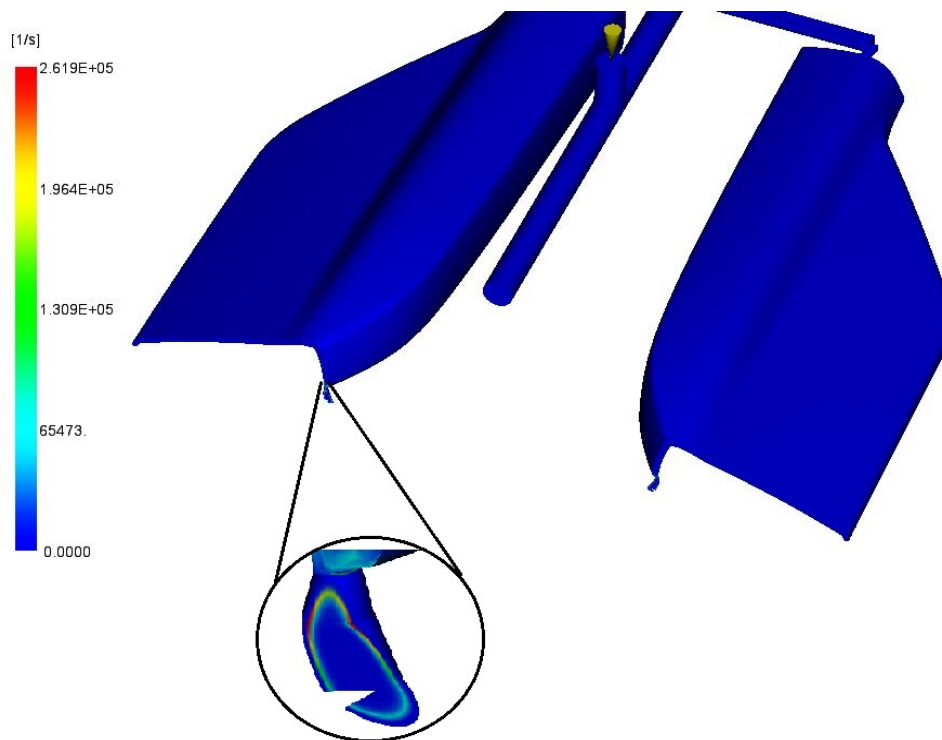
*Figura 59 - Pressão no final do enchimento para a solução "Cashew"*

Neste caso temos uma situação favorável pois a pressão mínima presente no molde é de 22.5MPa, o que indica o total enchimento das peças.



d) Velocidade de distorção

Com a análise deste resulta é possível prever a degradação total do material que não pode de maneira alguma exceder os  $50000 \text{ s}^{-1}$ .



*Figura 60 - Velocidade de distorção para a solução "Cashew"*

Feito um corte transversal à espessura da peça ilustrado na Figura 60, foi possível concluir que no cashew o material atinge velocidades de distorção muito elevadas que o levarão à degradação. Mais uma vez, a causa dá-se à restrita alimentação do molde, que ao ter uma área de passagem de material muito reduzida, para manter o caudal constante, a velocidade aumenta.

#### e) Tensões residuais

No caso das tensões residuais, ilustradas na Figura 61, devido a termos um ataque mais perto da última extremidade da peça a encher, a pressão de compactação é mais eficiente, causando uma tensão superficial aproximadamente constante e reduzida ao longo da peça, o que reduzirá empenos.

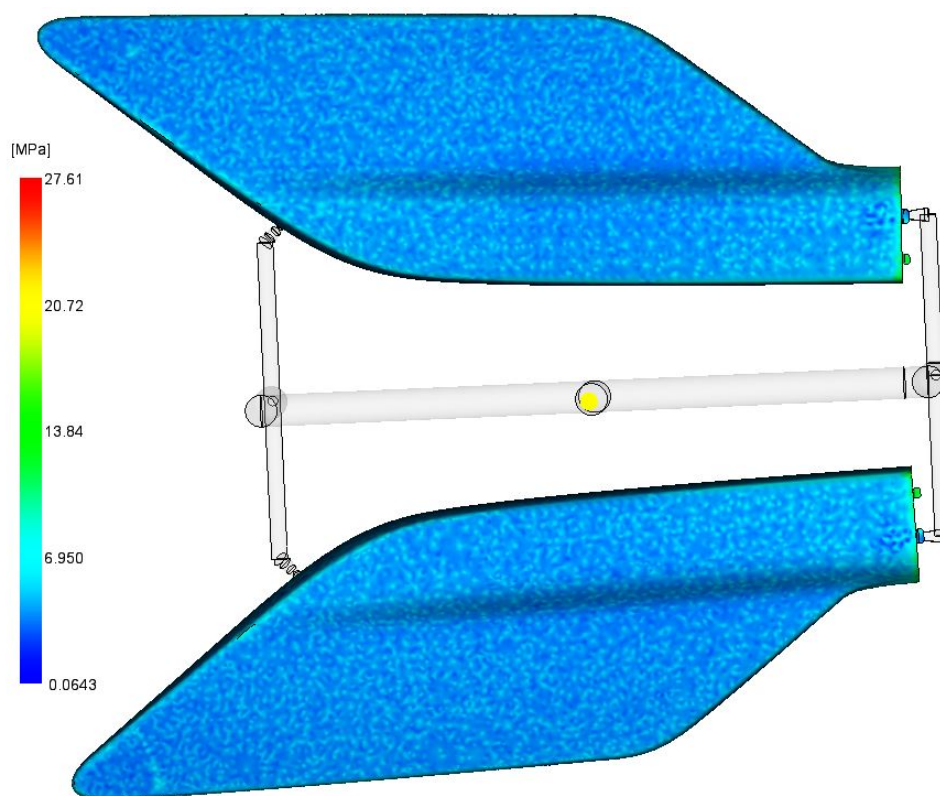


Figura 61 - Tensão residual superficial para a solução "Cashew"

Este resultado é bastante agradável para uma situação de pintura líquida, visto que teremos uma energia superficial constante ao longo de toda a peça, bastando para isso usar uma tinta com uma tensão superficial inferior à da superfície da peça que irá certamente produzir bons resultados.

### 3.4 Análise superficial

#### 3.4.1 Instrumentação

##### a) Inspeção Visual

Após a primeira inspeção visual foi possível verificar umas marcas na superfície da peça. A Figura 62 mostra essas marcas:



*Figura 62 - Marcas presentes nas peças*

No artigo [27], estas marcas são referidas como derivadas do grau de cristalização do polímero. Na experiência realizada, manteve-se a velocidade de injeção, a pressão de injeção e o tempo de compactação constante, variando apenas as temperaturas do fundido e do molde.

Na Tabela 2 estão representadas as condições de injeção da experiência:

*Tabela 2 - Condições de injeção,[27]*

	$T_m$ (°C)	$T_w$ (°C)	$V_{inj}$ (mm/s)	$P_2$ (bar)	$t_2$ (s)
$C_1$	210	25	10	200	1.5
$C_2$	250	60			

Onde,  $C_1$  e  $C_2$  representam as condições variáveis das injeções. As variáveis são a temperatura do fundido ( $T_m$ ) e a temperatura do molde ( $T_w$ ) e as constantes são a velocidade de injeção ( $V_{inj}$ ), a pressão de injeção ( $P_2$ ) e tempo de compactação ( $t_2$ ).

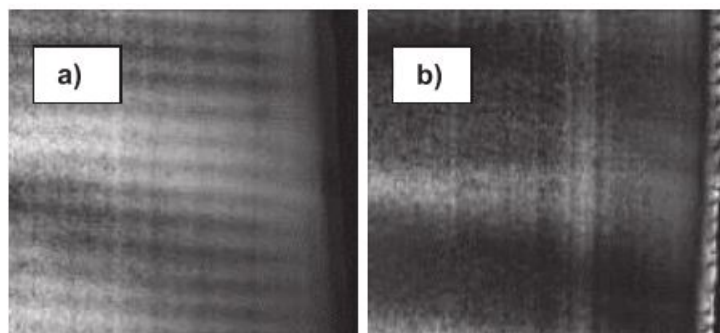


Figura 63 - Secção, normal à direcção do escoamento para as condições, a) C1 e b) C2,[27]

No caso da condição  $C_1$ , as temperaturas são mais baixas, logo têm um arrefecimento mais rápido o que leva a um grau de recristalização maior, onde é possível verificar as várias camadas que de polímero que vão solidificando junto da parede do molde até ao centro da peça. Já na condição  $C_2$ , as temperaturas são mais elevadas, o que leva a um tempo de solidificação superior, onde apenas se consegue observar o gradiente de solidificação (Figura 63).

Estas condições diferentes irão por consequência trazer tensões residuais diferentes à superfície, onde podemos especular que antes no final do enchimento existem zonas da peça à superfície que começam a cristalizar muito cedo, dando assim origem a empenos elevados e consequentemente tensões residuais à superfície também elevadas.

Através da análise visual, é também notório a presença de um rechupe na última extremidade a encher da peça.

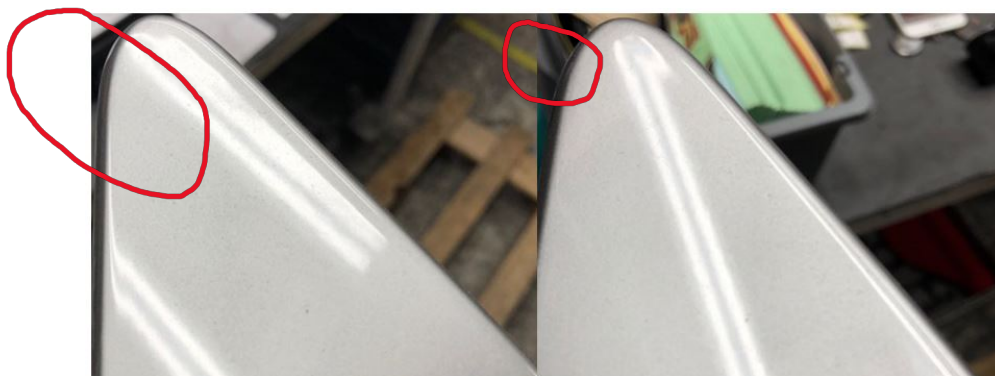


Figura 64 - Rechupe na cor cinza



*Figura 65 - Rechupe na cor laranja*

Na Figura 64 e Figura 65, está representado o rechupe nas peças pintadas, onde apenas conseguimos reparar no mesmo através do desvio não linear da luz refletida na peça. Isto significa que os rechupes podem ser medidos através da reflexão de luz.

#### b) Inspeção da energia superficial utilizando as canetas

Com a pesquisa bibliográfica feita, é sabido que as tensões superficiais estão relacionadas com a energia de superfície. É também de conhecimento corrente que as tensões superficiais ocorrem das tensões residuais presentes na peça. Podemos então presumir que tensões superficiais de compressão aumentam o ângulo de contacto, logo dificultam a molhagem da peça.



*Figura 66 - Esquema da influência das tensões de compressão na bolha*

Na Figura 66 temos representado a vermelho as tensões superficiais de compressão, a azul a bolha e a cinza o substrato.

Para o estudo da energia superficial, foram feitas várias medições que consistiram em analisar 4 áreas diferentes na peça, ilustradas na Figura 67. Como o método de medição é comparativo e pouco rigoroso, foram selecionadas 20 peças ao acaso, medidas, e por fim, com a ajuda do Excel, foi feita uma média para posterior comparação e análise com os resultados simulados.



*Figura 67 - Posição das áreas de análise*



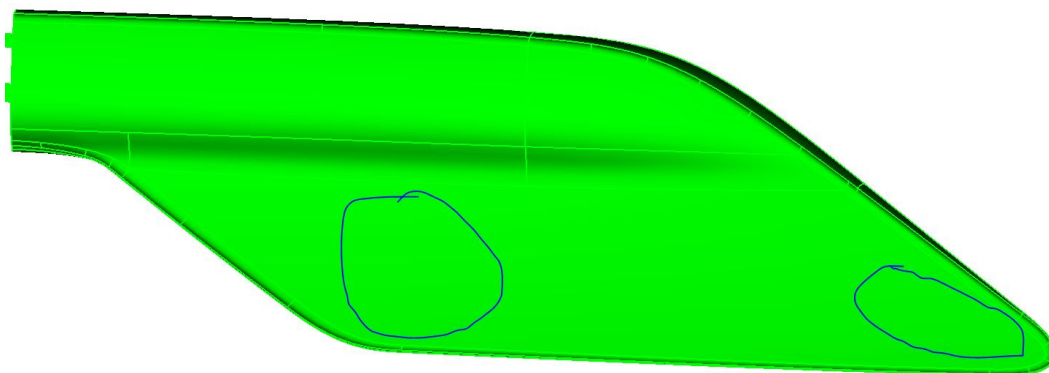


*Figura 68 - Exemplo de medição da energia superficial*

Na Figura 68 temos as várias tintas com as energias superficiais conhecidas e indicadas na figura (unidades em mN/m). Conseguimos facilmente ver que a tinta com energia superficial de 34 mN/m faz um traço perfeito sobre a peça com as bordas bem definidas, pelo que a peça terá uma superfície de maior energia que esta tinta. Em contraste, a tinta com energia superficial de 42 mN/m sofre uma contração não sendo de forma alguma boa para a pintura. Neste caso, a peça terá uma energia superficial inferior a 42 mN/m. Para concluir a análise, conseguimos ver que a energia superficial da peça está compreendida entre os 36 mN/m e inferior aos 38 mN/m, pois a tinta de 36 mN/m pinta a peça corretamente, já na tinta de 38 mN/m notamos uma contração da área onde passou o bico da caneta relativamente à área que a tinta cobre.

#### c) Inspeção com medidor de brilho

Para a medição do brilho com precisão, é necessário ter uma superfície o mais plana possível para minimizar a entrada de luz do exterior, sendo a superfície a centro da peça a posição de referência, pois esta é aproximadamente plana e não apresenta rechupes devido à inexistência de reforços e marcas de produção na zona. A posição na extremidade da peça é a que apresenta o fenómeno do rechupe. As posições estão ilustradas na Figura 69.



*Figura 69 - Posições de medição do brilho*

### 3.4.2 Resultados

#### a) Energia Superficial

Analisando 20 peças nas suas 4 posições representadas na Figura 67, foi obtido as seguintes estatísticas:

*Tabela 3 - Medição da energia superficial*

Peça	Posição				Média Peça
	1	2	3	4	
1	36	34	34	32	34
2	35	34	33	32	33,5
3	36	35	32	32	33,75
4	36	35	34	32	34,25
5	35	34	34	32	33,75
6	35	33	34	34	34
7	35	34	34	32	33,75
8	35	34	34	34	34,25
9	34	34	34	34	34
10	36	35	34	34	34,75
11	35	34	34	34	34,25
12	37	34	34	32	34,25
13	36	34	33	32	33,75
14	36	34	33	34	34,25
15	36	36	35	34	35,25
16	36	34	34	32	34
17	36	36	36	34	35,5
18	36	34	35	34	34,75
19	36	34	34	34	34,5
20	36	34	34	32	34
Média Posição	35,65	34,3	33,95	33	34,225

Pela Tabela 3 podemos retirar a conclusão que a energia superficial das peças vai diminuindo ao longo do caminho do escoamento no enchimento da peça porque as tensões residuais vão diminuindo. Poderíamos ainda dizer que para pintar a maioria das peças corretamente a energia superficial da tinta teria de ser 34 mN/m.

#### b) Rechupes

As peças em estudo apresentam rechupes visíveis nas peças virgens (Figura 70). Este rechupe aparece devido a uma elevada contração volumétrica, o que difere dos outros rechupes, pois não existe qualquer tipo de reforços ou marcas de produção na zona oposta coincidente ao rechupe.





Figura 70 - Rechupe peça virgem

Os rechupes são extremamente difíceis de qualificar. Devido à inexistência de reforços na zona, o Molflow não considera rechupe, porém, é uma marca preocupante pois é notória após pintura, nas várias cores.

### c) Brilho

Nas tabelas seguintes estão os valores das medições de brilho por cor:

Tabela 4 - Tabela de medição do brilho, GU

	Preto Brilhante		
	Posição Referência	Posição do rechupe	Diferença
1	88,2	88,1	0,1
2	90,4	85,7	4,7
3	89,4	86	3,4
4	88,1	86,8	1,3
5	90,7	84	6,7
6	90	83,5	6,5
7	90,6	85,2	5,4
8	89,1	87,7	1,4
9	90	86,8	3,2
10	90,7	87,2	3,5
Média	89,72	86,1	3,62
	Branco		
1	91,2	83,6	7,6
2	91,1	84,4	6,7
3	90,6	86	4,6
4	89,9	84,6	5,3
5	85,6	85,9	-0,3
6	90,7	87,6	3,1
7	91,2	85,6	5,6

8	87,6	85,4	2,2
9	85,0	84,1	0,9
10	90,1	84,6	5,5
Média	89,3	85,18	4,12
	Laranja		
1	88,5	83,3	5,2
2	89,6	85,9	3,7
3	89,9	86,3	3,6
4	89,1	87,5	1,6
5	90,2	86,6	3,6
6	90,9	86,6	4,3
7	90,6	86,9	3,7
8	90,2	87,1	3,1
9	90,4	85,8	4,6
10	88	86,1	1,9
Média	89,7	86,21	3,53
	Cinza		
1	99,1	97,2	1,9
2	97,9	97,4	0,5
3	97,5	97,8	-0,3
4	98,7	98	0,7
5	97,9	97,5	0,4
6	97,9	97,6	0,3
7	97,5	97,5	0
8	97,5	97,5	0
9	98,2	97,2	1
10	98,3	97,7	0,6
Média	98,1	97,54	0,51
	Virgem		
1	83,7	80,4	3,3
2	83,2	76,1	7,1
3	83,1	75,9	7,2
4	80,8	73,4	7,4
5	84,9	73,2	11,7
6	84,8	73,3	11,5
7	84,7	70,9	13,8
8	84,7	73	11,7
9	84,6	68,9	15,7
10	84,4	73,1	11,3
Média	83,9	73,82	10,07

Ao analisar a Tabela 4 é perceptível que as cores preto brilhante, branco e laranja apresentam ligeiras diferenças entre a posição de referência e a posição de rechupe. Apesar de esta diferença ser muito reduzida, esta poderá advertir para uma situação de rechupe.

### 3.4.3 Conclusões

#### a) Energia superficial

Através da análise estatística da Tabela 3, podemos visualizar que as tensões médias à superfície vão reduzindo ao longo do percurso de enchimento da peça, como ilustrado na Figura 71.

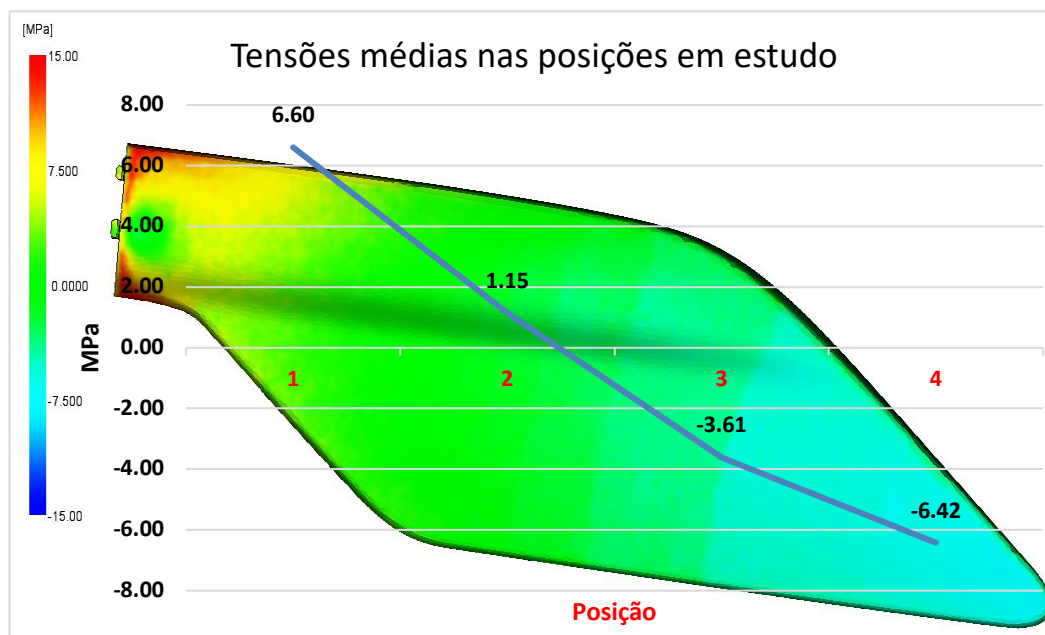


Figura 71 - Tensões médias nas posições em estudo

Para reforçar este resultado, teremos de provar que de facto as tensões superficiais da peça são de compressão, pelo que, através da simulação foi retirado o perfil de tensões para as 4 posições. É de frisar que devido às limitações computacionais, estes perfis exibem um esboço aproximado da tensão residual ao longo da espessura.

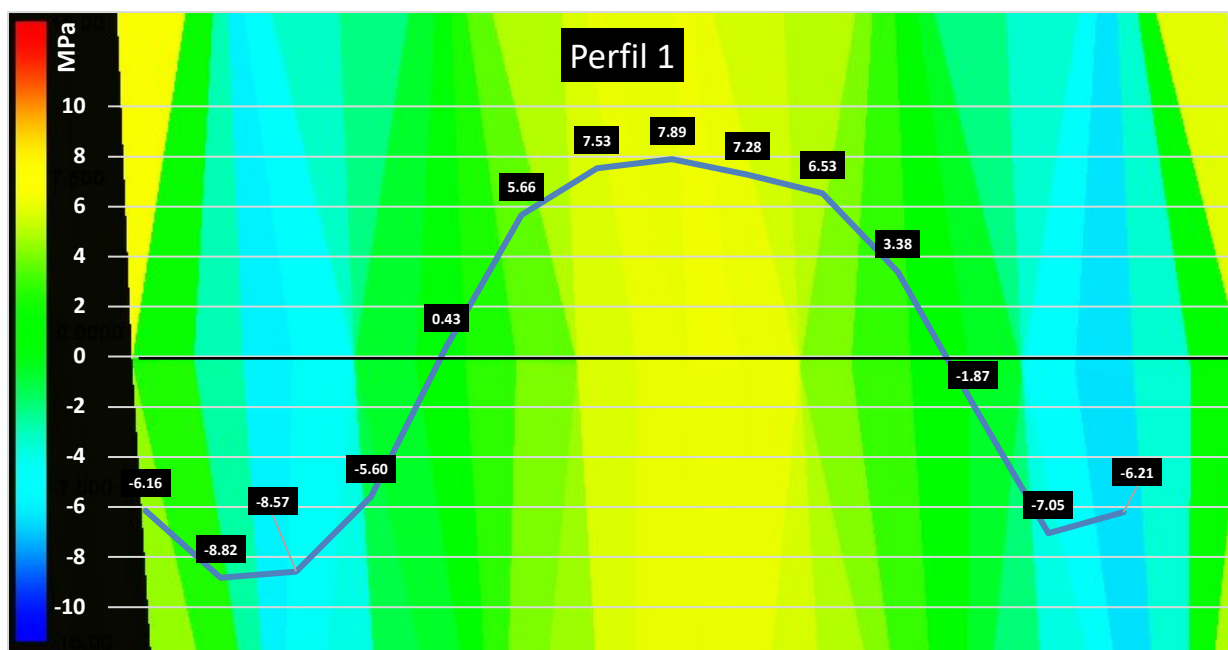


Figura 72 - Perfil da tensão residual para a posição 1

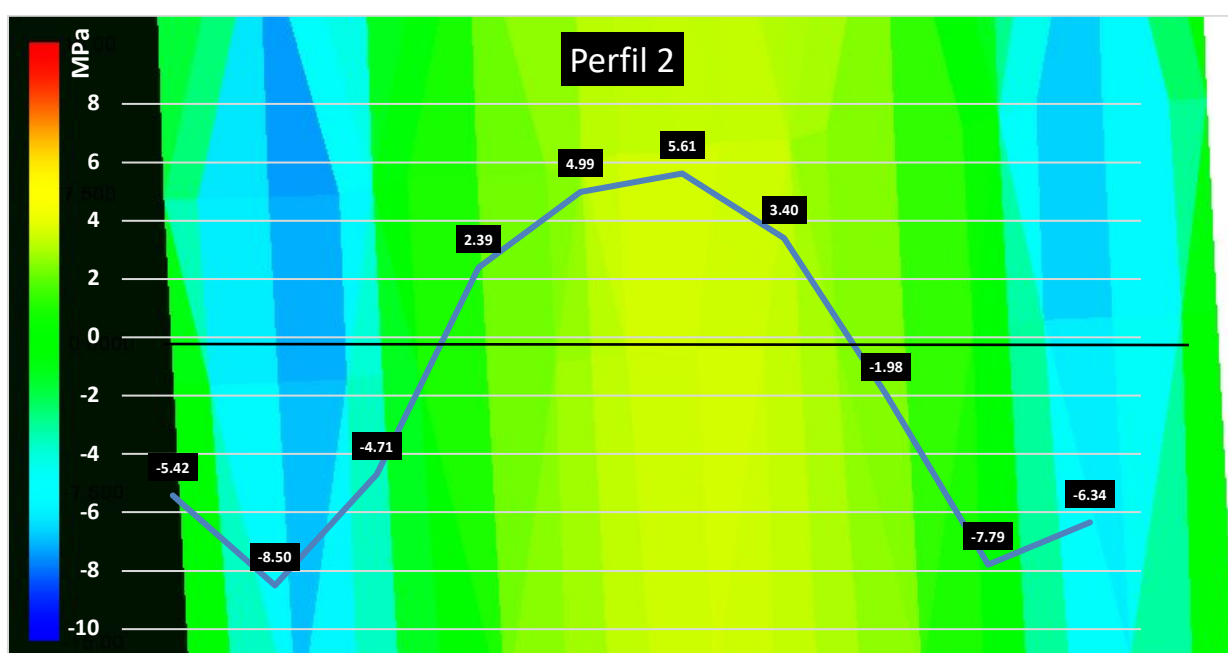


Figura 73 - Perfil da tensão residual para a posição 2

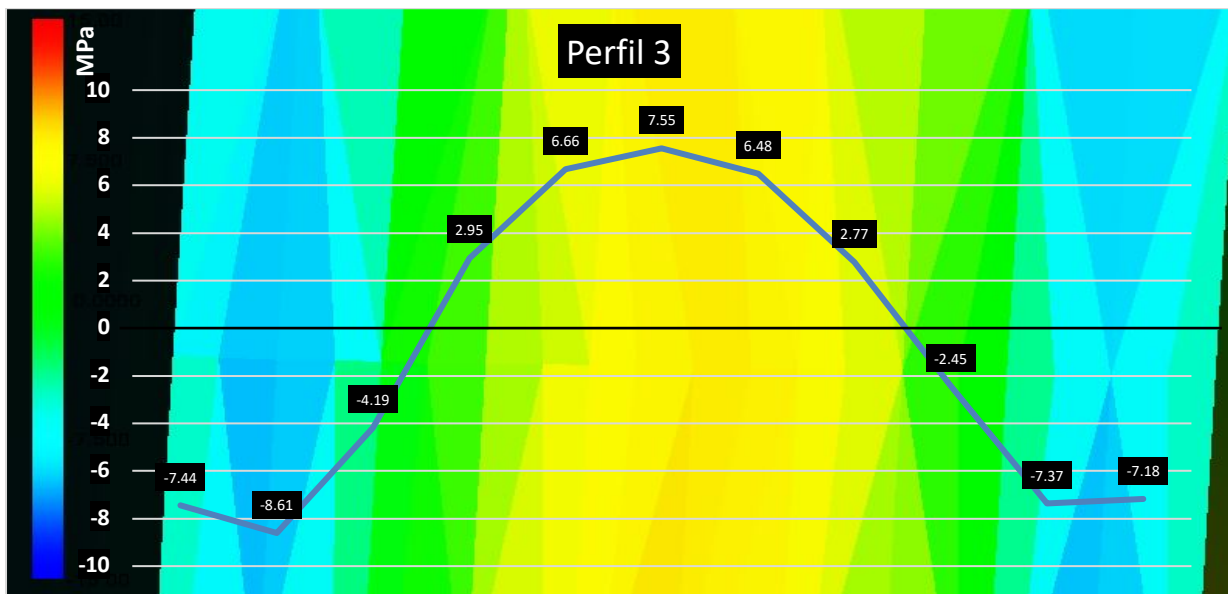


Figura 74 - Perfil da tensão residua para a posição 3

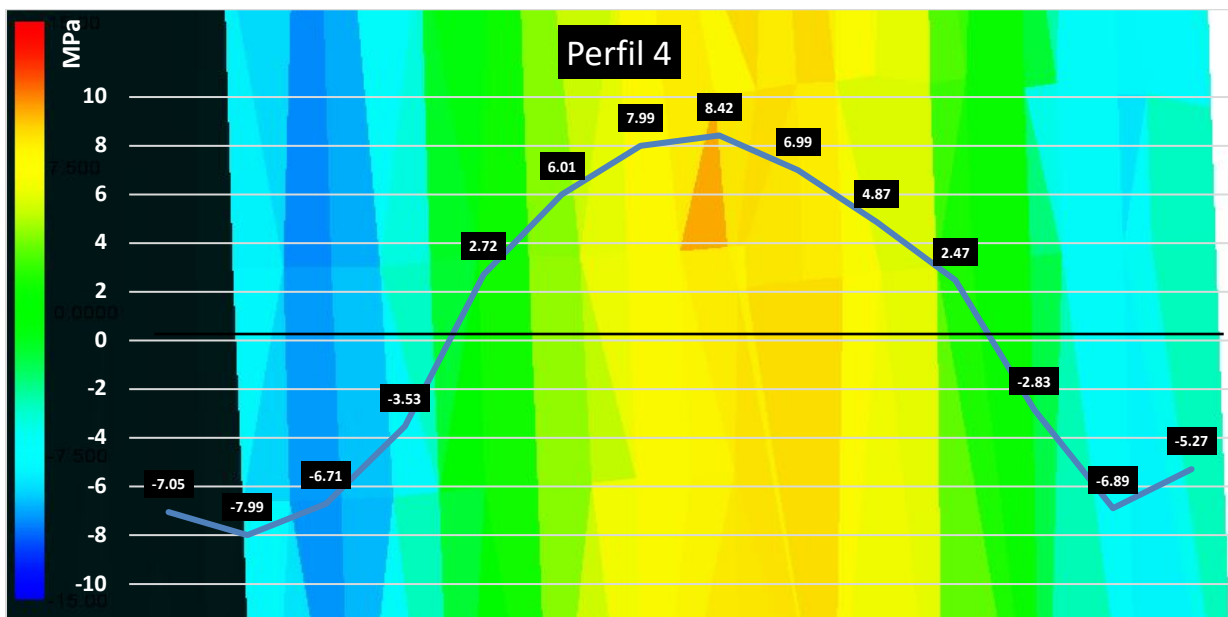
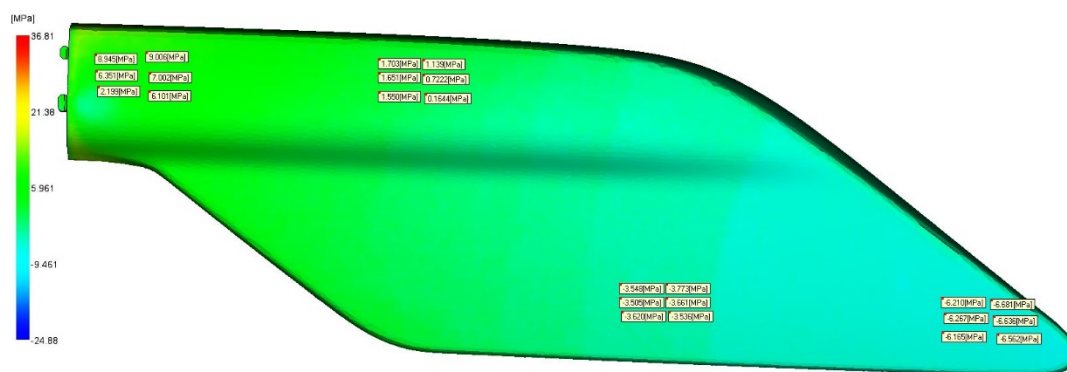


Figura 75 - Perfil da tensão residua para a posição 4

Através dos perfis ilustrados na Figura 72, Figura 73, Figura 74 e Figura 75, é possível concluir que a peça está à tração no centro da espessura e à compressão na superfície, porém, ao analisar a superfície, o Moldflow indica para a posição 1 esforços de tração à superfície e para a posição 2, esforços praticamente nulos à superfície, como se pode provar na Figura 76:



Estes esforços de tração não estão representados nos perfis devido à dificuldade de retirar o valor exato da superfície com a picagem num corte transversal ao perfil da peça. As tensões de tração nas posições 1 e 2 do estudo aparecem devido à baixa velocidade de injeção. Assim que o fundido é injetado a 250°C, entra em contacto com a parede do molde a 45°C, e devido ao tempo que este está em contacto com a parede do molde, solidifica antes do molde estar totalmente cheio, ou seja, a velocidade junto da parede do molde decresce rapidamente para zero não havendo tempo para existir a reorganização das cadeias de polímeros e consequentemente contração volumétrica do mesmo. Assim, uma espécie de casca ao início do enchimento é criada com tensões de tração, o que é positivo para uma pintura líquida. Porém, ao haver esta rápida solidificação durante a fase de enchimento provoca solidificações sem qualquer tipo de pressão associada, o que leva a uma contração do material e posteriormente, a tensões de compressão junto da superfície do molde.

Com o intuito de entender o aparecimento das tensões residuais à superfície, é importante analisar o comportamento do arrefecimento da peça ao longo da sua espessura. Assim, o Moldflow apresenta o resultado da contração volumétrica, onde é possível retirar a contração volumétrica ao longo da espessura da peça. Nas figuras abaixo, estão representados os perfis de contração volumétrica das 4 posições em estudo.

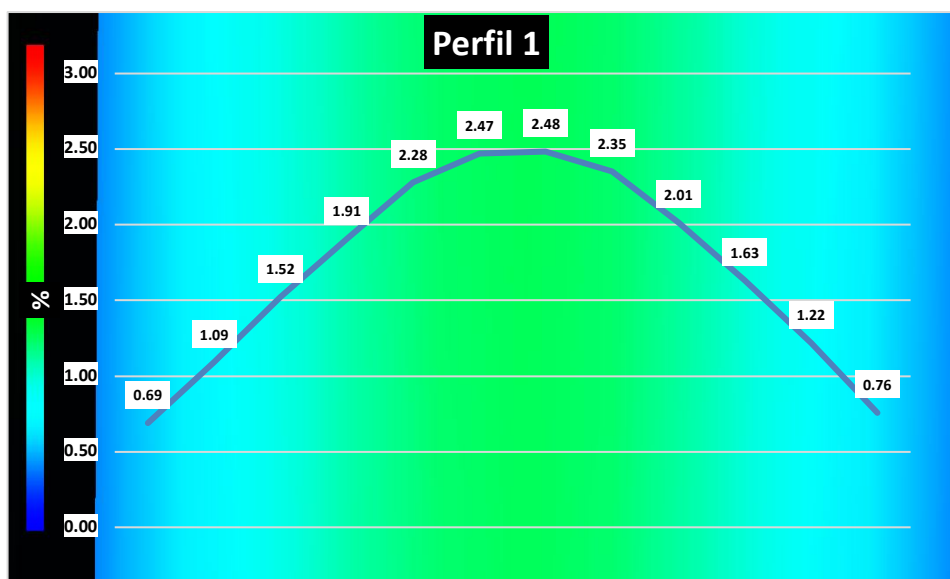


Figura 77 - Perfil da contração volumétrica na posição 1

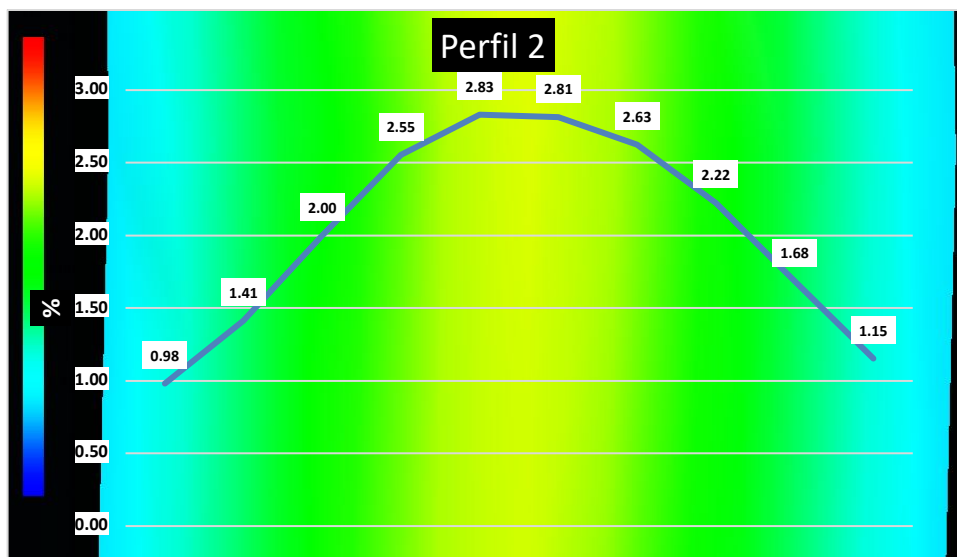


Figura 78 - Perfil da contração volumétrica na posição 2

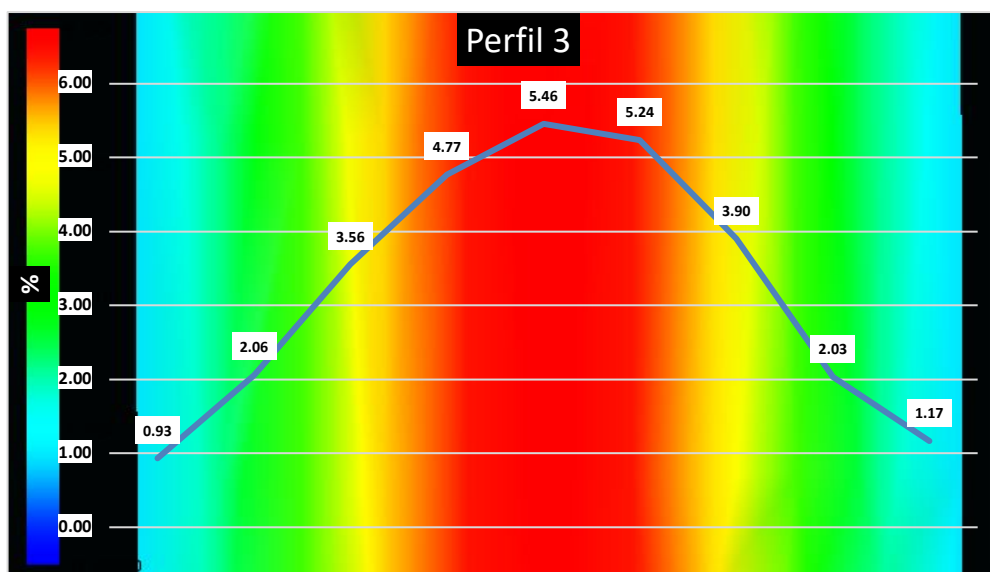


Figura 79 - Perfil da contração volumétrica na posição 3

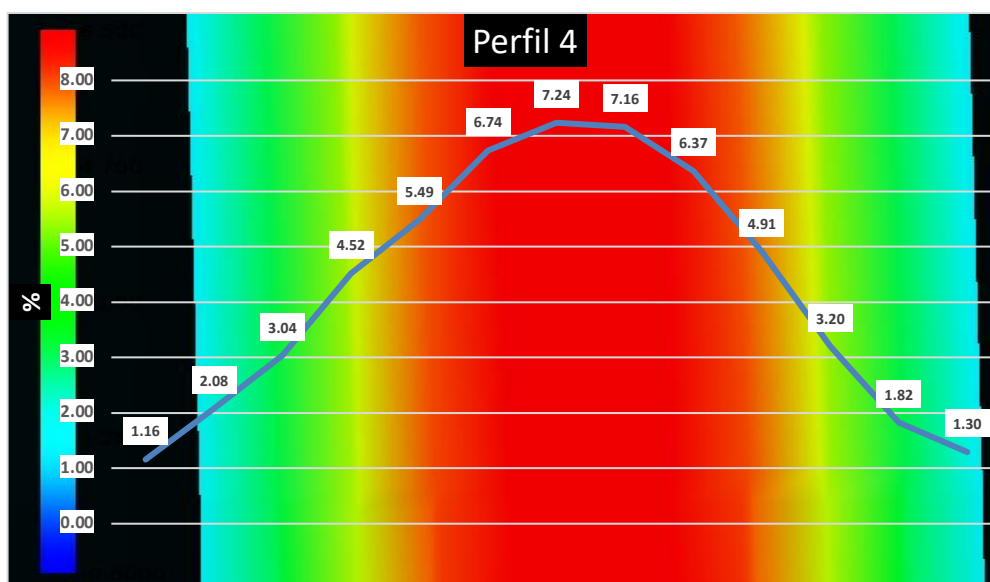


Figura 80 - Perfil da contração volumétrica na posição 4

É de notar que os 4 perfis ilustrados na Figura 77, Figura 78, Figura 79 e Figura 80 são semelhantes na geometria da curva representativa da contração volumétrica, onde apenas denotamos que os valores máximos (ao centro da espessura) vão aumentando ao longo das posições. Este resultado apoia mais uma vez o aparecimento de tensões superficiais compressivas visto que a parte central tem uma diminuição de espessura que irá causar zonas concavas na superfície da peça.

A contração volumétrica ao longo da espessura é ainda responsável pelos rechupes, onde localmente apresenta tensões de compressão à superfície.



Podemos ainda relacionar a contração volumétrica ao longo da espessura com a contração volumétrica superficial ao longo da peça. Desta forma é possível visualizar na Figura 81 a influência de uma sobre a outra.

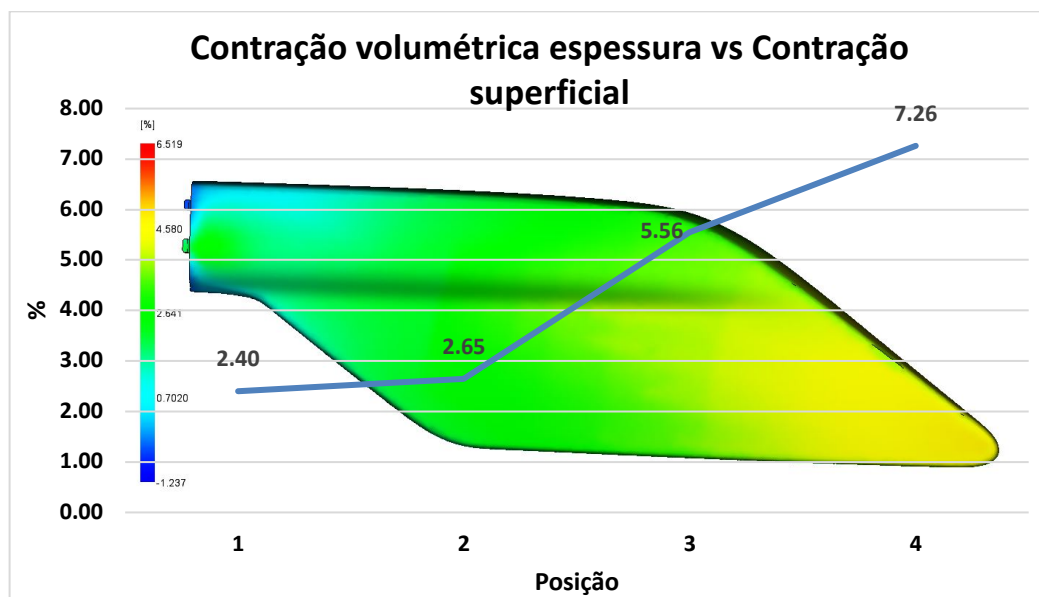


Figura 81 - Contração volumétrica ao longo da espessura vs Contração superficial

Para a construção deste gráfico, foram retirados os valores máximos de contração volumétrica no centro da espessura da peça, nas diversas posições em estudo.

Conseguimos facilmente concluir que, quanto maior a contração volumétrica na espessura da peça, maior será a contração a nível superficial, o que dará maiores tensões de compressão à superfície. Este resultado está de acordo com o demonstrado na Figura 71.

Podemos comprovar a diminuição da energia superficial ao longo da peça que coincide com o aumento das tensões de compressão à superfície:

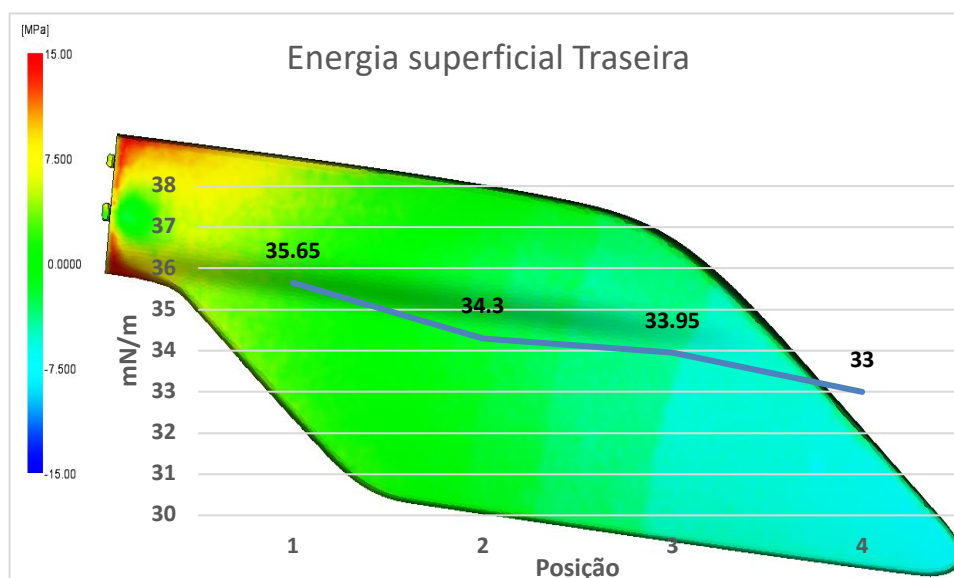


Figura 82 - Energia superficial vs Tensão residual à superfície traseira

Na Figura 82 podemos observar que há medida que a tensão de superfície vai diminuindo, a energia de superfície também, o que significa que poderá existir uma relação entre as duas.

b) Rechupes



*Figura 83 – Peças nas cores preto brilhante, branco e laranja, respectivamente*

Na Figura 83, a cor cinza apresenta uma particularidade relativamente às outras opções. As diferenças entre a posição de referência e a posição de rechupe são mínimas e praticamente não se considera rechupe. Este caso poderá ser explicado pela elevada refletividade desta cor. É de notar que a própria posição de referência, apresenta valores de uma reflexão quase perfeita, o que adverte para um rechupe não notório pelo medidor de brilho, devido à elevada reflexão desta cor. Na Figura 84 está ilustrada a peça na cor cinza.



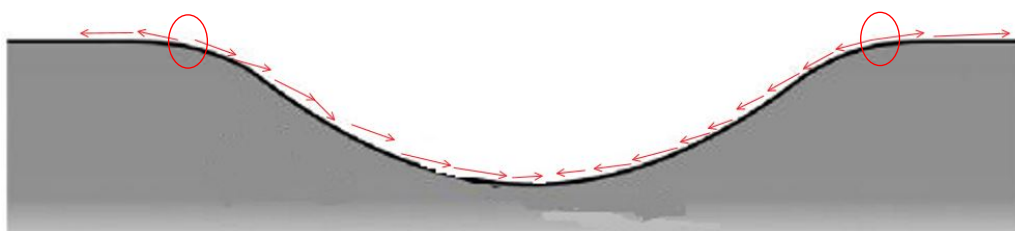
*Figura 84 - Peça na cor cinza*

Após as medições feitas às peças virgens e apresentadas na Tabela 4, é claramente notória a presença de um rechupe. A diferença entre a posição de referência e a posição de rechupe é bastante considerável. Este fenómeno pode ser explicado pela inexistência de camadas de tinta e de verniz que aumentam a refletividade da peça e por outro lado, não mantêm uma superfície totalmente lisa, pois a espessura da tinta varia ao longo da peça. Na Figura 85 está ilustrada a peça virgem.



*Figura 85 - Peça virgem*

Este efeito do rechupe é reduzido pela aplicação do revestimento, sendo que as tensões de compressão no centro do rechupe vão ajudar a formar uma bolha de tinta que consequentemente e localmente aumenta a espessura da peça. Porém, também existe tensões de tração na fronteira dos rechupes, que no caso de serem muito elevadas, pode levar a uma rotura de coesão na tinta e a marca ficará visível.



*Figura 86 - Tensões superficiais no rechupe, adaptado de[24]*

Essa rotura dar-se-ia entre a zona assinalada com um círculo vermelho representado na Figura 86.



## 4 Validação de resultados

Devido à falta de meios, todos os resultados anteriormente não são possíveis de validar, porém, para tentar entender a veracidade destes resultados, foi feito um estudo comparativo com as peças presentes no molde da solução atual. Estas peças estão representadas a amarelo na Figura 33.

### 4.1.1 Análise do enchimento

A primeira grande diferença é perceptível logo na fase de enchimento, onde as peças agora em estudo enchem praticamente 1 segundo antes das peças estudadas anteriormente.

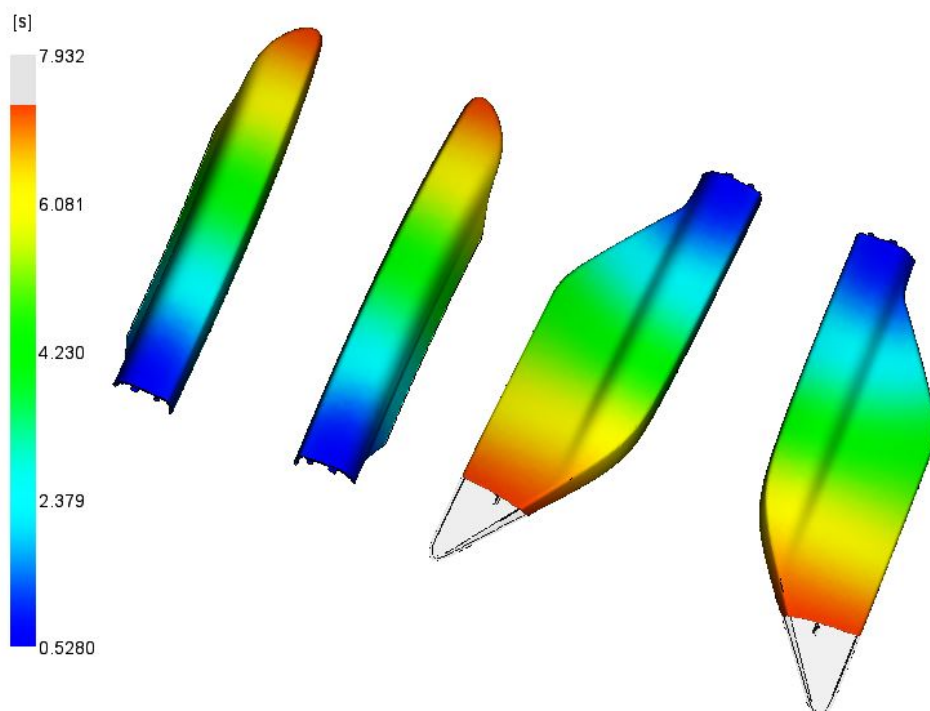


Figura 87 - Tempo de enchimento da cavidade do molde da solução atual

Após a análise deste resultado ilustrado na Figura 87, é perceptível que as peças pequenas irão sofrer uma compactação maior, visto que na fase de enchimento, têm já cerca de 1 segundo de compactação a mais relativamente às peças maiores presentes no molde. Toda esta análise da pressão de compactação está comprovada na Figura 45.

#### 4.1.2 Posições de estudo

Em semelhança ao estudo anterior, foram definidas 4 posições de estudo nas novas peças e seguidamente medidas com as canetas da energia superficial.



Figura 88 - Posições de estudo da segunda peça em estudo

Definidas as posições (Figura 88), foram retirados valores médios da energia superficial e contruído o gráfico ilustrado na Figura 89:

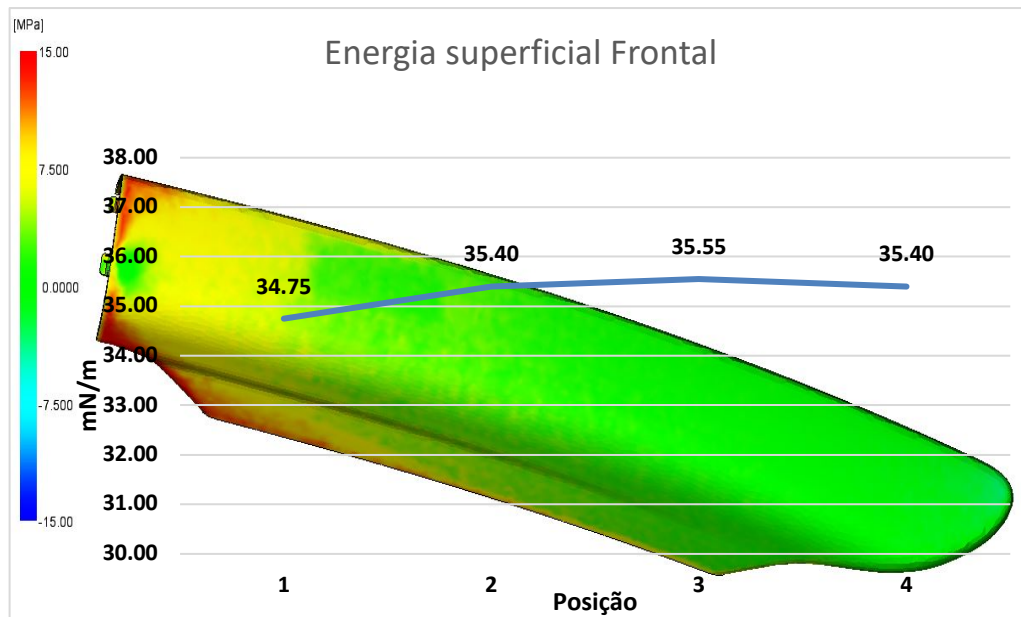


Figura 89 - Energia superficial vs Tensão residual à superfície frontal

É facilmente perceptível que, relativamente às peças traseiras, as peças frontais apresentam uma constante energia superficial, o que coincide com o facto de apresentar tensões superficiais praticamente nulas em toda a peça. Assim, é presumível assumir que a energia de superfície é diretamente influenciada pelas tensões superficiais.

## 4.2 Rechupes

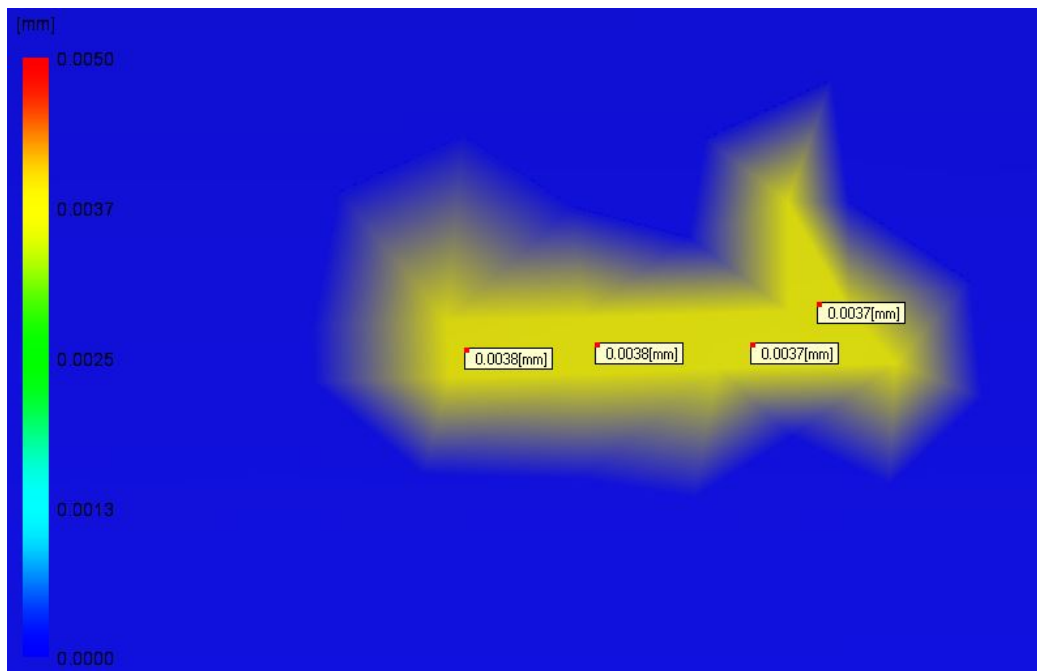
Tabela 5 - Rechupe e causa

	Rechupe	Causa
1		
2		

### 4.2.1 Rechupes das peças frontais

Para este caso de rechupes apresentados na Tabela 5, é impossível fazer a avaliação através da simulação devido às marcas de produção não serem representadas no CAD, pois estas variam consoante o lote de peças e a sua data de produção. Em todo o caso, o rechupe 1 é causado por um reforço, onde pode ser simulada a sua profundidade.





*Figura 90 - Rechupe causado pelo reforço na peça frontal*

No caso presente na Figura 90, temos a marca de rechupe causada por um reforço, já otimizado. Pelas regras de boa prática na injeção de plástico é sabido que o melhor balanço entre os reforços e as marcas de rechupes é cerca de 1/3 da espessura da peça. Neste caso, a peça tem 3mm de espessura e o reforço apresentado 1mm. Assumindo que estes valores são os otimizados, é perceptível que já estamos em valores muito baixo de cavidade, porém, visíveis a quão a peça se encontra virgem.

Apesar de terem um impacto visual forte na peça virgem, quando as peças são revestidas, passa a ser imperceptível.



## 5 Conclusões e Trabalhos futuros

### 5.1 Conclusão

Com este trabalho foi possível prever que elevadas tensões de compressão à superfície irão produzir maus resultados relativamente a pinturas líquidas, pois as tensões superficiais irão comprimir as bolhas fazendo com que as ligações coesas sejam destruídas, comprometendo assim a molhagem de toda a peça. Para contrariar este problema, é necessário fazer com que as tensões à superfície sejam nulas ou de tração, porém a tensão residual de tração têm de ser maiores que a tensão superficial da tinta para fazer com que esta se espalhe por toda a superfície da peça.

Para o caso em estudo, os canais de alimentação devem ser redimensionados com vista ao aumento de caudal. Desta forma, a injeção era feita num tempo menor o que iria diminuir as tensões de compressão à superfície uma vez que estas aparecem devido a pequenas frações solidificadas antes do enchimento do molde. Porém, é necessário ter em consideração que os ataques foram dimensionados para remover os canais de alimentação com facilidade e aumentando esse caudal, a dificuldade de remoção dos canais também será maior.

Outro aspeto importante será rever o balanceamento do enchimento do molde para não existir uma pressão muito elevada no bico de injeção devido à diferença de tempos de enchimento das peças frontais para as peças traseiras.

No caso de uma injeção com maior celeridade, seria também positivo para uma pintura líquida, a adição de canais de refrigeração junto da superfície a pintar, onde apenas seria ativado o caudal de água na fase de pressurização, para garantir que não existiria solidificações antes do molde estar cheio e pressurizado.

### 5.2 Trabalho futuro

Como trabalho futuro é proposto fazer várias injeções com diferentes parâmetros de modo a criar diferentes tensões superficiais. Seguidamente, analisar as energias de superfície com equipamento apropriado e perceber a relação quantitativa entre as tensões residuais criadas na peça e a sua energia de superfície. Deste modo, será possível criar uma base de boas práticas

de injeção para componentes plásticos que irão adquirir o revestimento através da pintura líquida, assim como definir níveis máximos de empeno tendo em consideração a qualidade superficial final.

- [1] PlasticsEurope Market Research Group (PEMRG) / Consultic Marketing & Industrieberatung GmbH, "Plastics – the Facts 2017," 2017. [Online]. Available: <http://www.plasticseurope.org/>.
- [2] R. A. Malloy, *Plastic Part Design for Injection Molding*, Second Edi. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2010.
- [3] "Classification of Plastics." [Online]. Available: [http://www.dc.engr.scu.edu/cmdoc/dg\\_doc/develop/material/classify/a1000001.htm](http://www.dc.engr.scu.edu/cmdoc/dg_doc/develop/material/classify/a1000001.htm).
- [4] "InjectionMolding System.", Custompartnet, [Online]. Available: <http://www.custompartnet.com/wu/InjectionMolding>.
- [5] "2 plate mold." [Online]. Available: <https://knowledge.autodesk.com/support/moldflow-adviser/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2018/ENU/MoldflowAdviser-Modelprep/files/GUID-B6B2F7B6-C6FE-4278-80D9-8A77210C662C-htm.html>.
- [6] "3 plate mold." [Online]. Available: [https://knowledge.autodesk.com/support/moldflow-adviser/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2018/ENU/MoldflowAdviser-Modelprep/files/GUID-E402E280-A20E-4D1D-A8D6-C54F2D430EF2-htm.html?st=2 plate mold](https://knowledge.autodesk.com/support/moldflow-adviser/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2018/ENU/MoldflowAdviser-Modelprep/files/GUID-E402E280-A20E-4D1D-A8D6-C54F2D430EF2-htm.html?st=2%20plate%20mold).
- [7] "2 plate with HotRunners.", Autodesk, [Online]. Available: <https://knowledge.autodesk.com/support/moldflow-adviser/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2018/ENU/MoldflowAdviser-Modelprep/files/GUID-D764A355-68BE-417E-9604-C19E06317C14-htm.html>.
- [8] G. Ström, M. Fredriksson, and P. Stenius, "Contact angles, work of adhesion, and interfacial tensions at a dissolving Hydrocarbon surface," *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 119, no. 2, pp. 352–361, 1987.
- [9] F. Awaja, M. Gilbert, G. Kelly, B. Fox, and P. J. Pigram, "Adhesion of polymers," *Prog. Polym. Sci.*, vol. 34, no. 9, pp. 948–968, 2009.
- [10] J. H. C. and A. C. Wicks, "Adhesion under water: surface energy considerations," *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 21, pp. 267–273, 2001.
- [11] V. Thakur and D. C. Angstadt, "Influence of temperature on micro-feature replication at ambient pressure in micro-molding," *Annu. Tech. Conf. - ANTEC, Conf. Proc.*, vol. 2, pp. 643–647, 2007.
- [12] "Wettability and contact angle." [Online]. Available: <https://www.kruss-scientific.com/applications/coating-of-polymers/>.
- [13] "Corona treatment." [Online]. Available: <http://www.vetaphone.com/technology/corona-treatment/>.
- [14] D. Hegemann, H. Brunner, and C. Oehr, "Plasma treatment of polymers for surface and adhesion improvement," vol. 208, 2003, pp. 281–286.
- [15] "Young's equation." [Online]. Available: <https://www.kruss-scientific.com/services/education-theory/glossary/youngs-equation/>.
- [16] F. M. Fowkes, "Attractive Forces At Interfaces," *Ind. Eng. Chem.*, vol. 56, no. 12, pp. 40–52, 1964.
- [17] D. H. Kaelble, "Dispersion-polar surface tension properties of organic solids," *J. Adhes.*, vol. 2, no. 2, pp. 66–81, 1970.
- [18] "Polar and dispersive connection." [Online]. Available: <https://www.kruss-scientific.com/services/education-theory/glossary/owens-wendt-rabel-and-kaelble-owrk-method/>.
- [19] D. K. Owens and R. C. Wendt, "Estimation of the surface free energy of polymers," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 13, no. 8, pp. 1741–1747, 1969.

- [20] W. A. ZISMAN, "Relation of the Equilibrium Contact Angle to Liquid and Solid Constitution," vol. 43, pp. 1–51, 1964.
- [21] A. Burdzik, M. Stähler, M. Carmo, and D. Stolten, "Impact of reference values used for surface free energy determination: An uncertainty analysis," *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 82, no. December 2017, pp. 1–7, 2018.
- [22] C. Shen, L. Wang, W. Cao, and L. Qian, "Investigation of the effect of molding variables on sink marks of plastic injection molded parts using Taguchi DOE technique," *Polym. - Plast. Technol. Eng.*, vol. 46, no. 3, pp. 219–225, 2007.
- [23] W. Guo, L. Hua, and H. Mao, "Minimization of sink mark depth in injection-molded thermoplastic through design of experiments and genetic algorithm," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 72, no. 1–4, pp. 365–375, 2014.
- [24] D. P. Gruber, J. Macher, D. Haba, G. R. Berger, G. Pacher, and W. Friesenbichler, "Measurement of the visual perceptibility of sink marks on injection molding parts by a new fast processing model," *Polym. Test.*, vol. 33, pp. 7–12, 2014.
- [25] "Método dos elementos finitos." [Online]. Available: <https://www.esss.co/blog/metodo-dos-elementos-finitos-o-que-e/>.
- [26] "Glossmeter." [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Glossmeter>.
- [27] M. Gomes, A. J. Pontes, and J. C. Viana, "Influence of the local morphology on the surface tension of injection molded polypropylene," *AIP Conf. Proc.*, vol. 1593, pp. 199–203, 2014.